

*Treball de Fi de Grau*

**Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Estudi del comportament d'un circuit hidràulic i les seves  
torres de refrigeració**

## **MEMÒRIA**

**Autor:** Oriol Jornet Llasat  
**Director:** Esteve Jou Santacreu  
**Convocatòria:** Gener 2018



**Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



## Resum

Dia rere dia la tecnologia i la indústria avancen de la mà a un ritme vertiginós, fent possible la millora de les condicions de producció i el progrés. Tal i com ho va ser durant la Revolució Industrial, a dia d'avui el sector industrial i energètic és encara un pilar bàsic en l'economia de Catalunya, essent la comunitat autònoma amb major participació en el PIB industrial espanyol amb el 25% [1].

Un circuit hidràulic és indubtablement, una de les parts fonamentals de la indústria de l'era actual. La part encarregada de transportar l'aigua que s'utilitza al llarg de tot el procés productiu fins a totes les regions de la fàbrica, i que consta en molts casos de torres de refrigeració que permeten renovar les condicions de l'aigua sense la necessitat d'un riu aprop.

La temàtica que es tracta en aquest treball conegut com "Estudi del comportament d'un circuit hidràulic i les seves torres de refrigeració", és l'anàlisi del comportament d'un circuit de refrigeració d'una planta industrial a Catalunya. Fent especial ènfasi en les seves torres de refredament per poder estudiar el seu funcionament, la seva participació dins del circuit i els càlculs del seu procés.

El projecte, a més, també consta d'una part de bombes, una de les màquines hidràuliques més utilitzades en la indústria, en la que s'estudiarà el seu comportament dins d'una instal·lació hidràulica.

La part pràctica del treball consisteix en modelitzar el circuit hidràulic i a partir de les dades obtingudes calcular per mitjà de dues metodologies diferents el cabal que circula hi a través. Aquestes dues metodologies tenen molt a veure amb el que s'ha explicat als paràgrafs anteriors, ja que la primera d'elles serà corresponent a les torres de refrigeració, mentre que el segon mètode tindrà a veure amb les bombes. El desenvolupament de la part pràctica d'aquest treball s'ha realitzat gairebé en la seva totalitat mitjançant l'anàlisi de *big data* amb fulls de càlcul. Tot plegat per a acabar posant en comú els anàlisis i les dues metodologies emprades per al càlcul del cabal.



## Sumari

Resum.....	1
Sumari .....	3
Glossari .....	5
Introducció .....	6
Objectius del projecte .....	6
Abast del projecte.....	7
Memòria .....	8
1. Descripció de les instal·lacions i la seva problemàtica prèvia .....	8
1.1. Descripció de la planta industrial.....	8
1.2. Antecedents i problemàtica prèvia.....	11
1.3. Esquematització dels procediments a seguir per a resoldre el problema .....	13
2. Fonaments de teoria.....	15
2.1. Les torres de refrigeració.....	15
2.1.1. Definició .....	15
2.1.2. Principi d'acció .....	15
2.1.3. Tipus de torres .....	16
2.1.4. Funcionament d'una torre de tir induït .....	19
2.1.5. Base del càlcul.....	20
2.2. Bombes hidràuliques.....	21
2.2.1 Definició .....	21
2.2.2. Tipus de bombes .....	21
2.2.3. La bomba centrífuga .....	22
2.2.4. Les bombes en un circuit. Base del càlcul .....	23
3. Modelització del circuit. Metodologia i càlculs .....	28
3.1. Modelització de les torres.....	28
3.1.1. Obtenció de les dades .....	28
3.1.2. Tractament de les dades.....	29
3.1.3. Hipòtesis .....	30
3.1.4. Metodologia de càlcul .....	31
3.1.5. Càlcul.....	32
3.2. Modelització de les bombes.....	34
3.2.1. Obtenció de les dades .....	34
3.2.2. Tractament de les dades.....	36
3.2.3. Metodologia del càlcul .....	37
3.2.4. Càlcul.....	38

4. Resultats .....	40
4.1. Cabals obtinguts per cadascun dels mètodes.....	40
4.2. Comparació dels cabals obtinguts pels dos mètodes.....	47
4.3. Expectatives de futur .....	52
5. Conclusions .....	53
6. Estudi d'impacte ambiental .....	54
7. Pressupost .....	55
Agraïments.....	56
Referències i Bibliografia.....	57
Annex.....	59
A. Diagrama Psicromètric .....	59
B. Taules de càlculs i resultats .....	60
B.1. Càlcul de les entalpies de l'aire .....	60
B.1.1. Càlcul de l'entalpia de l'aire a l'entrada de la torre de refrigeració EWK-900/09 .....	60
B.1.2.. Càlcul de l'entalpia de l'aire a la sortida de la torre de refrigeració EWK-900/09.....	64
B.1.3. Mesures i càlcul del cabal de l'aire sec.....	67
B.2. Càlcul del cabal que circula a través de cada bomba .....	68
B.3. Càlcul del cabal d'aigua que circula a través d'una torre de refrigeració EWK-900/09 .....	71

## Glossari

- **CSN:** Circuit Sector Nord. És un dels dos circuits hidràulics de la planta industrial, el que es troba més al nord.
- **Refredament evaporatiu:** procés mitjançant el qual es refreda aire mitjançant l'evaporació de l'aigua. Es basa en emprar la gran entalpia de vaporització de l'aigua.
- **Diagrama Psicromètric:** És un diagrama que relaciona múltiples paràmetres relacionats amb una barreja d'aire: temperatura, humitat relativa, humitat absoluta, punt de rosada, entalpia o calor total, calor sensible, calor latent i volum específic de l'aire. No és constant ja que és variable amb l'altura sobre el nivell del mar.
- **Temperatura de bulb humit:** Es mesura amb un termòmetre de mercuri de vidre embolicat en amb una gassa que es manté humida i amb una constant circulació d'aire. L'evaporació de l'aigua del termòmetre té un efecte de refredament, de manera que la temperatura indicada pel termòmetre de la temperatura humida (o bulb humit) és sempre inferior a la temperatura indicada pel termòmetre sec (o bulb sec), exceptuant quan la humitat relativa té un valor del 100%, és quan les dues temperatures tenen el mateix valor.
- **Temperatura seca de l'aire:** és la temperatura de l'aire, prescindint de la radiació calorífica dels objectes que envolten aquest ambient i dels efectes de la humitat relativa i de la velocitat de l'aire. La temperatura seca és la temperatura que es mesura amb un termòmetre de manera habitual.
- **Rebliment:** Material d'alta superfície específica, lleuger, inert, resistent i estable on es produeix l'intercanvi de calor entre l'aire i l'aigua. Pot ser de PVC, polipropilè (PP), poliestirè (PE), plàstics tractats, metalls, fusta i fibrociment, entre d'altres materials.

## Introducció

Aquest treball de fi de grau pretén realitzar un estudi d'un circuit hidràulic i les seves corresponents torres de refrigeració mitjançant el tractament de grans bases de dades. El circuit hidràulic a analitzar forma part d'una planta industrial per a la fabricació de plàstics. Les torres de refrigeració, per la seva banda, s'encarreguen de reduir la temperatura de l'aigua del circuit en qüestió.

En projectes d'enginyeria hidràulica no sempre és fàcil trobar paràmetres tant senzills com poden ser el cabal d'un circuit, el punt de funcionament d'una bomba, o la calor intercanviada en una torre de refrigeració. Sovint, les dades que permeten resoldre els problemes són incompletes o defectuoses, i d'altres vegades, simplement les dades resulten difícils d'aconseguir. És per això que en aquest projecte s'han volgut calcular alguns dels paràmetres típics d'una instal·lació hidràulica tals com els cabals o l'entalpia, en aquestes situacions.

Per altra banda, les bases de dades que han sigut proporcionades per l'empresa són grans quantitats de variables (moltes de les quals no són necessàries per al projecte) que caldrà adaptar per poder fer els càlculs necessaris.

En aquest primer apartat introductori es pretén fer una breu explicació dels fets que precedeixen el projecte, a l'hora que se'n defineixen els objectius i l'abast.

## Objectius del projecte

L'objectiu del projecte que es desenvoluparà al llarg de les següents pàgines és, en una sola frase: el càlcul dels cabals d'aigua que circulen a través d'un circuit de refrigeració a partir d'una gran base de dades incompleta per a l'estudi.

Es vol calcular aquest cabal per mitjà de dos mètodes diferents per després comprovar si coincideixen i per tant es pot assumir que el càlcul és fiable. Es realitzarà el càlcul del cabal d'aigua que circula a través de les torres de refrigeració per una banda, i paral·lelament es calcularà el cabal que circula per les bombes hidràuliques del circuit.

A més, es busca estudiar el comportament tant de les bombes hidràuliques, com de les torres de refrigeració dins d'un circuit hidràulic real. Analitzant com es comporten segons els requeriments del circuit.

Un altre dels objectius és estudiar el comportament de la temperatura de l'aigua en l'entrada i la sortida del sistema de refrigeració, evaluant així la correcta funcionalitat de la instal·lació.

Així doncs, el principal objectiu d'aquest projecte serà analitzar si la millora introduïda ha aconseguit estabilitzar el circuit i si les temperatures d'entrada i sortida de l'aigua obtingudes

són les adequades. Això s'aconseguirà modelitzant el propi circuit mitjançant l'estudi dels cabals per dos mètodes diferents, i comprovant posteriorment que els resultats s'hi aproximïn.

El treball consta d'una part teòrica i d'una part pràctica enfocada al funcionament de les torres i les bombes utilitzades en aquest tipus de plantes de producció, que permetran aprofundir en el seu funcionament, el seu ús, els càlculs dels seus paràmetres i en les seves formes de control i monitorització.

### Abast del projecte

Com s'ha explicat en l'apartat anterior, el focus d'estudi dins d'aquest projecte és el sistema encarregat de la refrigeració del circuit hidràulic. Això són, principalment, les torres de refredament i els components que les envolten.

S'entén per “components que les envolten” tot aquells que intervenen en el funcionament de les torres, en modifiquen el comportament, o permeten extreure'n dades que després serviran per fer l'anàlisi de les torres.

Així doncs, tant les bombes, com els ventiladors de cada torre, com les mesures termodinàmiques de la temperatura de l'aire i de l'aigua, es consideren com a aquests components que permeten extreure dades i per tant també entraran dins dels marges de l'estudi.

No es tindran en compte ni la maquinaria de fabricació, ni les tuberies, ni els dipòsits d'aigua del circuit. És a dir, que es prendran o s'extrauran les dades de zones properes a les torres, i per tant, no serà objecte d'interès tot allò que hagi passat abans o després de les torres. Més enllà de que l'aigua passa d'una temperatura freda a una calenta després de passar per la planta.



## Memòria

### 1. Descripció de les instal·lacions i la seva problemàtica prèvia

#### 1.1. Descripció de la planta industrial

La planta industrial consta d'una nau central coberta que conté tota la màquinaria de producció, i de dos circuits hidràulics de refrigeració independents que s'encarreguen de connectar les màquines amb el sistema de refrigeració (torres, dipòsits, bombes, etc). L'estudi fet en aquest projecte es centra en només un dels dos circuits, anomenat Circuit Sector Nord.

En aquest circuit, l'aigua freda s'emmagatzema majoritàriament en un tanc d'aigua cúbic (Dipòsit Principal) que es troba molt proper a les torres de refrigeració i té un volum de 90 m<sup>3</sup>. D'ell en surten quatre canonades amb les seves respectives vàlvules antiretorn seguides d'unes bombes Johnson-Pump model CombiNorm 80-160, dues d'elles amb rodets de 169mm i les altres dues de 179mm. Les quatre bombes impulsen l'aigua a través de tot el sistema de canonades fins a la màquinaria de la nau. El sistema de conductes de retorn, porta l'aigua de tornada, ara escalfada després d'haver estat utilitzada per les màquines, fins a l'altre tanc del circuit, anomenat Dipòsit Intermig. Aquest dipòsit, que és més petit que el principal, té una capacitat de 15 m<sup>3</sup>. (Veure esquema a la Figura 1.1).

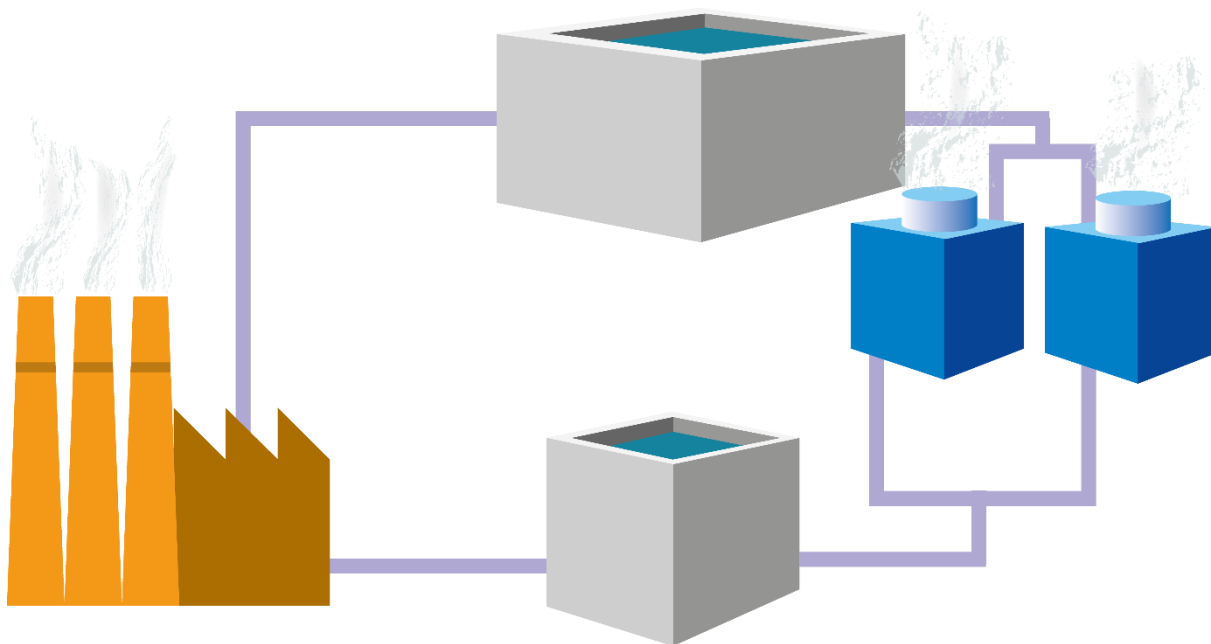


Figura 1.1. Esquema de la planta industrial amb els components del circuit que afecten al projecte

Del Dipòsit Intermig en surten tres conductes, seguits també cadascun de la seva vàlvula antiretorn i d'una bomba Johnson-Pump model CombiNorm 80-160 amb rodets de 180 mm. Aquestes tres bombes porten l'aigua calenta al conjunt de torres de refrigeració per reduir-ne la temperatura, tornar l'aigua al Dipòsit Principal, i tornar a iniciar el cicle.

Actualment, el Circuit Sector Nord (a partir d'ara també CSN) disposa d'un conjunt de 6 torres de refrigeració, de les quals en podem distingir tres tipus diferents:

- **Obra civil.** Tres torres construïdes just sobre del Dipòsit Principal. Disposen d'un ventilador cadascuna, però en temporada d'hivern es troben aturats.
- **Torre DECSA.** Es tracta d'una torre prefabricada Decsa model TVA-180 amb dos ventiladors. Tot i apareixer en l'esquema (veure Figura 1.2), actualment està anulada i no intervé en la refrigeració.
- **Torres EWK.** Dues torres prefabricades models EWK-900/09/11 i EWK-900/09/12, la primera de l'any 2005 i la segona instal·lada l'any 2017 per substituir el funcionament de la torre Decsa. Els dos models consten d'un ventilador cadascun.

L'aigua de retorn del circuit s'acumula al Dipòsit Intermig a l'espera de poder ser passada a través de les torres per poder iniciar el procés refrigeratiu. El nivell del Dipòsit Central marca l'instant en que les tres bombes del Dipòsit Intermig poden impulsar o no aigua cap a les torres. En altres paraules, els nivells dels dipòsits resulten fonamentals a l'hora d'estipular quan és necessari bombejar l'aigua cap a la planta o les torres. De no fer-ho correctament es podria superar la capacitat màxima d'aquests, o bé quedar-se sense aigua.

Cal notar també que malgrat que totes les torres de refrigeració es troben obviament a l'exterior, la major part del circuit hidràulic (bombes, gran part de les canonades, etc), transcorre sota terra.



## 1.2. Antecedents i problemàtica prèvia

Abans de la primavera de 2017, es va detectar un problema en l'eficiència del sistema de torres de refrigeració del circuit hidràulic, de manera que a l'abril d'aquell mateix any es va decidir instal·lar una modificació que resolgués aquesta problemàtica. És important fer especial èmfasi en aquests antecedents per poder comprendre després l'anàlisi fet en aquest treball.

Prèviament a detallar el problema i la solució, també és important conèixer que per a que tot el funcionament de la fàbrica sigui el correcte, cal que la temperatura de sortida de l'aigua de les torres de refrigeració es mantingui sempre dins d'un interval. És a dir, que l'aigua que es troba al Dipòsit Principal i que es farà arribar a la maquinaria de la fàbrica no estigui sobreescalfada, ni tampoc massa freda.

Així mateix, cada torre de refredament té el seu propi ventilador (a excepció de la Torre Decsa que en té dos però que no està operativa), l'activitat del qual va directament relacionada amb la capacitat de la torre. Un ventilador aturat implica que la torre refreda aigua molt més lentament, ho fa de manera natural. En canvi, per a un encès, com més potència estigui utilitzant, més estarà fent baixar la temperatura de l'aigua. No obstant, per al cas d'estudi, tots els ventiladors treballen únicament a dos nivells idèntics, off i on.

Des d'un punt de vista global, el funcionament dels ventiladors del CSN es pot explicar amb el gràfic esquemàtic de la Figura 1.3. Es marca una temperatura nominal  $T_N$  de l'aigua per al circuit, (per al cas del CSN,  $T_N = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), i un marge superior  $T_{sup}$  i un inferior  $T_{inf}$ . Aquestes dues temperatures  $T_{sup}$  i  $T_{inf}$  seran les que marcaran l'interval dins del qual la temperatura de l'aigua serà correcta per al funcionament de la planta.

Ara bé, si es té  $T_N$  fora de l'interval de treball, es modifica el comportament dels ventiladors. En el moment en que l'aigua que arriba a les torres supera la  $T_{sup}$ , s'activa el primer ventilador, o el que es el mateix, entra en funcionament la primera torre, que habitualment és una de les dues EWK. Si passat un cert temps ( $t$ ) la temperatura de l'aigua segueix per sobre d'aquest marge superior  $T_{sup}$ , s'activa un segon ventilador. I si al cap d'un altre interval de temps,  $T_N$  segueix sent major que  $T_{sup}$ , s'encendria un tercer ventilador.

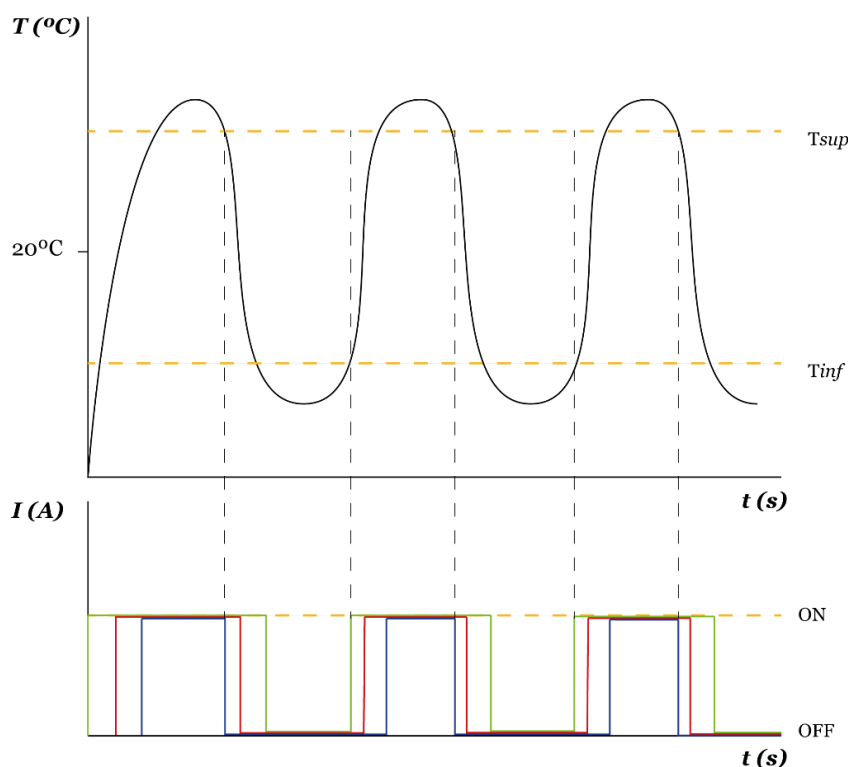


Figura 2.3. Gràfic esquemàtic: Temperatura-temps i Intensitat dels ventiladors temps que representa la problemàtica anterior. Cada color representa el funcionament d'un dels ventiladors.

Arribats a aquest punt, i amb tres ventiladors actius, suposem que s'aconsegueix que  $T_N < T_{sup}$ . Moment en el qual el tercer dels ventiladors s'atura. A partir d'aquí, després de sengles intervals  $t$ , es van aturant la resta.

El problema es troba doncs, en que si en el moment en el que s'encén el tercer ventilador, la temperatura ja està pràcticament un altre cop dins l'interval de temperatures, com que tenim tres ventiladors en funcionament, la tendència de la temperatura serà baixar molt ràpidament. De manera que no es podrà establitzar  $T_N$  dins l'interval, i de seguida  $T_N < T_{inf}$ .

En aquesta nova situació, s'apagarien els tres ventiladors i es deixaria que  $T_N$  es tornés a incrementar de forma natural fins que s'establís de nou dins l'interval. De la mateixa manera que en el cas  $T_{sup} > T_N$ , en aquesta situació tornaria a succeir el mateix, ja que a l'agafar la  $T_N$  una tendència de creixement tant forta, no es podria establitzar entre  $T_{sup}$  i  $T_{inf}$ , i tornaria a superar el marge superior. De nou, s'activaria el primer ventilador, després el segon, i així successivament fins que la temperatura baixés per sota  $T_{sup}$ .

Com es veu, la temperatura de l'aigua oscil·laria continuament entre temperatures per sobre  $T_{sup}$  i per sota  $T_{inf}$ , exposant al circuit a una inestabilitat permanent. Així mateix, el funcionament dels ventiladors no seria el més òptim, ja que estan en continu encès i apagat. La solució a tota aquesta problemàtica s'instal·là l'abril de 2017 en forma de controlador PID. La idea trobada va ser que no s'havien d'encendre o apagar els ventiladors només fixant-se en si  $T$  estava dins dels marges, sinó que també era important estudiar-ne la seva tendència. Per exemple, en cas que  $T$  superés el límit  $T_{sup}$  i per tant entrés a funcionar el primer ventilador,

al cap d'un temps  $t$ , s'analitzarien dues informacions. La primera dada important és si  $T$  segueix per sobre de l'interval. I de ser així, en segona instància es miraria si  $T$  segueix augmentant o bé disminueix. Amb una  $T > T_{sup}$  i en creixement, s'activaria el segon ventilador, però en canvi, si  $T > T_{sup}$  però decreix no s'activaria aquest segon ventilador, sinó que es seguiria refredant només amb un fins que  $T$  tornés a quedar entre  $T_{sup}$  i  $T_{inf}$ .

En temporades d'hivern donat que l'aigua no es sobreescalfa tant i que la temperatura exterior és molt més baixa, només funciona un ventilador o dos segons es desitgi. Això és degut a que la diferència de temperatures d'aigua entre l'entrada de la torre i la sortida no és tant gran com en períodes més calorosos. També és possible programar la instal·lació de manera que treballin dos ventiladors amb la mateixa càrrega de treball al llarg d'un període de temps. Mitjançant aquesta opció es busca repartir el desgast i la fatiga de les torres en dues parts iguals, evitant sobrecarregar una de les dues torres.

### 1.3. Esquematització dels procediments a seguir per a resoldre el problema

Malgrat que inicialment el projecte volia incloure també part de l'estudi i el disseny del controlador PID, finalment no ha pogut ser així donat que en l'inici del càlcul ja estava instal·lat al complet. És per això que s'ha decidit analitzar-ne el seu rendiment i determinar si la millora ha aportat el que el circuit requeria o no. A més d'estudiar-ne el seu comportament a través dels cabals.

Per a fer-ho, s'ha decidit modelitzar el circuit des de dos enfocaments diferents per acabar calculant dues vegades el cabal que circula a través de la instal·lació, i veure així si ambdós resultats tenen el mateix comportament o no. De tenir-lo, implicaria que la modificació introduïda és correcta, a la vegada que la modelització feta també ho és, i que les simplificacions i hipòtesis adoptades són assumibles pel circuit.

El càlcul del cabal doncs, es fa, primer a partir de les torres, i seguidament a partir de les bombes de retorn (les tres del Dipòsit Intermig). Per al primer cas, mitjançant les mesures de temperatures d'aire i aigua que s'han obtingut a l'entrada i a la sortida de la torres de refrigeració, es modelitza aquesta torre per acabar calculant el cabal d'aigua instantani que es refrigera. D'altra banda, el segon càlcul del cabal, el que es fa a partir de les bombes, es troba sumant els cabals de les tres bombes Johnson Pump del Dipòsit Intermig. Per a cada bomba, tenint les dades de la seva velocitat instantània de gir del motor i els seus paràmetres nominals, es dibuixaran les cobres característiques per a cada velocitat de gir. Més tard, trobant el punt de tall amb la seva corba resistent, es determina el seu cabal a través de la bomba quan aquesta treballa a la velocitat en qüestió. S'explicaran amb més detall tots aquests mètodes de càlcul en el capítol de teoria següent.

Totes les modelitzacions s'han fet en base a les dades obtingudes d'un dia en concret. El dia escollit és el dia 8 de desembre de 2017, per al que s'han monitoritzat totes les dades que es

volien obtenir (temperatures, bombes...) desde les 7 fins les 21h en intervals de 10 minuts. S'han escollit aquests horaris considerant que és suficient per visualitzar correctament el comportament del circuit, i aquests intervals ja que l'aparell de mesura de temperatura dona dades cada 10 minuts. Vegis que el fet de comparar un cabal calculat d'una manera, amb el mateix cabal calculat d'una altra, fa que el dia d'estudi no sigui rellevant i pugui ser escollit aleatoriament.

## 2. Fonaments de teoria

### 2.1. Les torres de refrigeració

#### 2.1.1. Definició

Les torres de refrigeració són un tipus d'intercanviadors de calor que posen en contacte una massa d'aire sec i fred en contracorrent amb una massa d'aigua escalfada per un procés industrial o de climatització. La seva finalitat és disminuir les temperatura del cabal d'aigua calenta.

Aquesta aigua calenta sol caure pulveritzada i a l'intercanviar calor amb l'aire fred, vaporitza una part d'ella, eliminant-se de la torre en forma de vapor d'aigua. [2]

És important destacar que són equips que s'utilitzen per refredar aigua en grans quantitats degut a que són el mitjà més econòmic per fer-ho. Sobretot si es comparen amb altres equips que tenen la mateixa funcionalitat, com podrien ser els intercanviadors de calor, on la transferència de calor té lloc a través d'una paret.

#### 2.1.2. Principi d'acció

El principi d'acció d'aquests equips es basa en el refredament evaporatiu. L'equip produeix un núvol de gotes d'aigua, bé per pulverització o bé per caiguda lliure, que es posa en contacte amb una corrent d'aire. L'objectiu és en ambdós casos augmentar la superfície de contacte i per tant el procés de transferència. Per fer-ho, l'interior de les torres està dotat d'uns conductes als que s'anomena rebliment, per on circulen els dos fluids i on té lloc l'intercanvi.

El rebliment és un conglomerat de tubs molt petits que es troben a l'interior de la torre i per dins dels quals descèn l'aigua pulveritzada que cedeix calor al flux d'aire. Aquests tubs solen ser de plàstics tals com el polipropil·lè (PP), el polietilè (PE) o el polièster (PRFV), però també poden ser d'altres materials. S'escull el material en funció de les característiques de l'aigua a refrigerar. [3]

El rebliment retrassa el temps de caiguda, incrementant així també el del fenomen, a la vegada que fa més petites encara les gotes pulveritzades. En aquestes condicions, la calor de l'aigua es transfereix a l'aire que l'envolta per radiació, per conducció tèrmica i per evaporació. Els dos primers fenòmens són pràcticament negligibles, de manera que gairebé la totalitat de la calor s'evapora.

Consegüentment, l'evaporació superficial d'una petita part de l'aigua induïda pel contacte amb l'aire, dona lloc al refredament de la resta de l'aigua que cau al dipòsit d'aigua a una temperatura inferior a la de pulverització.



Aquest fenomen va ser explicat per Merkel l'any 1925, que va desenvolupar el model matemàtic mitjançant el qual s'entén la transferència de calor al reblliment de les torres. El model matemàtic s'anomena Equació de Merkel tot i que no s'estudiarà en aquest treball. [4]

### 2.1.3. Tipus de torres

La forma més simple i usual de classificar les torres de refrigeració és segons la forma en la que es mou l'aire a través d'elles. Segons aquest criteri, existeixen torres de circulació natural i torres de tir forçat. En les torres de circulació natural el moviment de l'aire només depèn de les condicions climàtiques i ambientals, mentre que les de tir forçat utilitzen ventiladors per moure l'aire a través de la torre.

- **Torres de circulació natural**

Es poden classificar en torres atmosfèriques i torres de tir natural.

- *Torres atmosfèriques*: El moviment de l'aire depèn del vent i de l'efecte aspirant dels aspersors. S'utilitza en petites instal·lacions. Depèn dels vents predominants pel moviment de l'aire. Actualment es troben en desús.
- *Torres de tir natural*: el flux d'aire necessari s'obté com a resultat de la diferència de densitats, entre l'aire més fred de l'exterior i l'humit calent de l'interior de la torre. Utilitzen xemeneies de gran alçada per obtenir el tir desitjat. Són molt utilitzades en les centrals tèrmiques i rarament es poden veure en una planta industrial degut a la forta inversió inicial que suposen. Veure Figura 2.1



Figura 2.1. Torres de tir natural, que són molt comuns en centrals tèrmiques

- **Torres de tir forçat:**

Es tracta de torres compactes amb una secció transversal i una alçada de bombeig petites en comparació amb les torres de tir natural. En aquestes torres es pot controlar de forma molt precisa la temperatura de l'aigua de sortida, podent-se aconseguir valors d'apropament molt petits (fins a 1 o 2 °C, tot i que a la pràctica acostuma a ser de 3 o 4 °C).

S'entèn per valor d'apropament la diferència entre la temperatura de l'aigua freda i la temperatura de bulb humit de l'aire. Aquest valor d'apropament sempre és funció de les condicions tèrmiques i de la capacitat de la torre. És important comprendre que la temperatura de bulb humit marca la temperatura màxima de refredament de l'aigua, tot i que mai serà possible assolir aquest valor, sinó que l'aigua freda sortirà 3-4 °C per sobre.

Segons la posició del ventilador, en distingim tres tipus:

- *Tir forçat:* l'aire es descarrega a baixa velocitat per la part superior de la torre i és forçat per un ventilador situat a la part inferior. És a dir, són gairebé sempre de flux a contracorrent i són més eficients que les de tir induït. L'aire que es mou és aire fred de major densitat que en el cas del tir induït. Significa que l'equip mecànic tindrà més duració en el temps que en el tir induït, ja que el ventilador treballa amb aire fred no saturat, que és menys corrosiu que el calent i saturat. El seu inconvenient és la possibilitat de que existeixi recirculació de l'aire de sortida cap a la zona de baixa pressió creada pel ventilador a l'entrada d'aire.

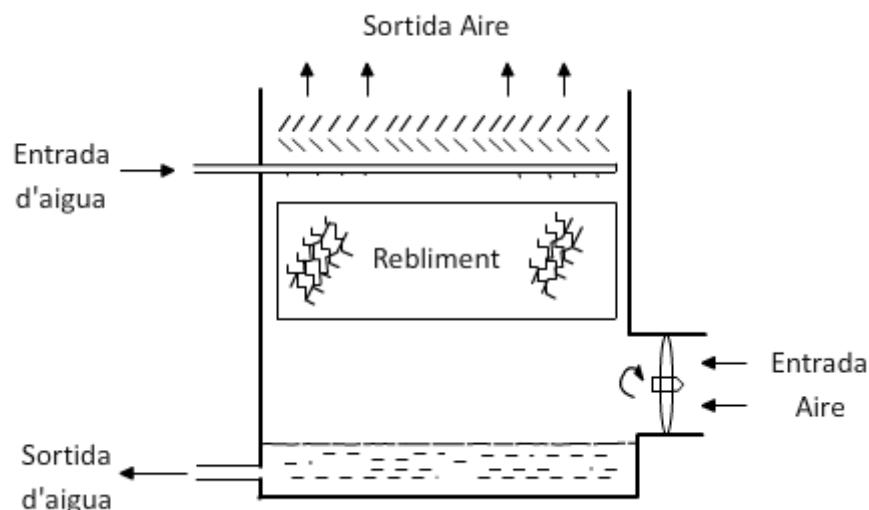


Figura 2.2. Dibuix esquemàtic d'una torre de refrigeració de tir forçat

- *Tir induït*: poden ser de flux a contracorrent o creuat. En el cas a contracorrent, l'aire es succiona a través de la torre mitjançant un ventilador situat en la seva part superior. De manera que aigua i aire tenen la mateixa direcció però sentit oposat. El seu avantatge és que l'aigua més freda es posa en contacte amb l'aire més sec, aconseguint-se així un màxim rendiment. Són les més utilitzades.

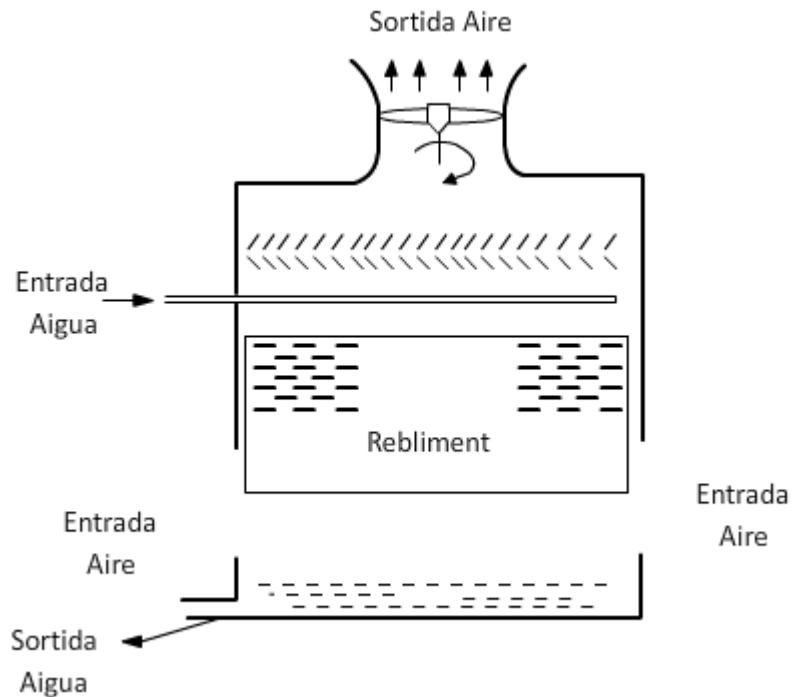


Figura 2.3. Dibuix esquemàtic d'una torre de refrigeració de tir induït.

- *Torres de flux creuat*. Tot i ser una variant del tir induït, es considera com un tipus més. L'aire entra pels laterals de la torre fluint horitzontalment a través de l'aigua que cau. Aquestes torres necessiten més aire i tenen un cost d'operació més baix que les de contracorrent. Així mateix, necessiten una alçada menor que les de flux a contracorrent, mentre que el seu inconvenient principal és que no són recomanables per obtenir un gran salt tèrmic o un valor d'apropament petit. Per obtenir-ho es necessitaria major superfície transversal i més potència de ventilació que en el cas de la torre de flux a contracorrent.

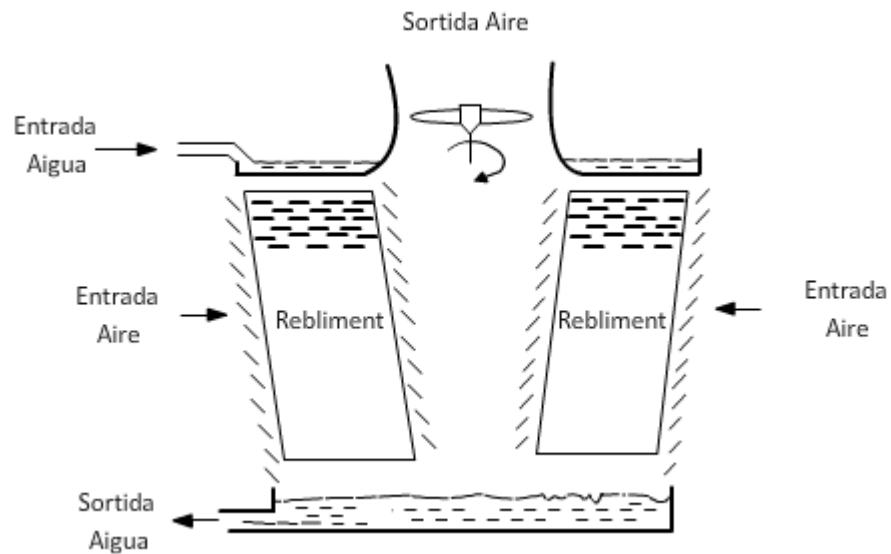


Figura 2.4. Dibuix esquemàtic d'una torre de refrigeració de flux creuat.

#### 2.1.4. Funcionament d'una torre de tir induït

Les torres EWK-900/09/11 i EWK-900/09/12 del circuit a analitzar són torres prefabricades de tir induït. Cal recordar que les tres torres d'obra civil no s'utilitzen a l'hivern i que la torre Decsa no es troba activa actualment, motiu pel qual no s'entrarà a detallar-les.

L'aigua calenta es bombeja en menor mesura ja que són més baixes que les de tir natural, i per tant l'aigua es precipitarà desde menor alçada. Una vegada bombejada, l'aigua procedent del circuit a refrigerar, es pulveritza mitjançant uns aspensors des de la part superior de la torre sobre el rebliment, descendint així pels seus canals. El rebliment separa les gotes pulveritzades en gotes encara més petites. Permetent d'aquesta manera que s'augmenti el temps i l'àrea de transferència de calor. Aquestes partícules d'aigua són les que en contactar amb l'aire, fan que es satori d'humitat.

El cabal d'aire, es mou de baix a dalt gràcies al ventilador situat a la part superior de la torre, que l'extreu per absorció. La sortida d'aire es produeix per la part més alta de la torre, i porta les petites gotes d'aigua que ha arrastrat durant el seu recorregut ascendent. Per a que aquestes gotes no es dispersin en l'ambient exterior, s'instala un separador de gotes just abans de la sortida de la corrent d'aire a l'atmosfera.

L'aigua refredada que ha baixat pels canals del rebliment es recull a la part inferior de la torre per mitjà d'una safata que disposa de sistemes de control del nivell, la qual determina la quantitat d'aigua de reposició que s'ha d'aportar al circuit. Finalment, l'aigua de la safata es torna refredada al circuit.

### 2.1.5. Base del càlcul

Per a trobar els paràmetres de disseny (cabals, humitats i temperatures de l'aire i de l'aigua) que intervenen en una torre de refrigeració, es treballa amb balanços de massa pràcticament sempre.

Els tres balanços que s'utilitzen són el màssic d'aire, el màssic d'aigua i el d'energia.

El flux màssic d'aire sempre és el mateix en l'entrada que en la sortida ja que no hi han entrades ni sortides addicionals d'aire i per tant:

$$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Per al flux màssic d'aigua, en canvi, es té en compte l'aigua que s'introdueix al circuit hidràulic menys la que es perd. Les entrades d'aigua són les de reposició i la humitat provinent de l'aire, mentre que la sortida és únicament l'aigua evaporada per la torre. Cal notar que la part de l'aigua que es pulveritza i va a parar a la safata de recollida d'aigua refrigerada ni es guanya ni es perd. El balanç queda de la següent forma:

$$\dot{m}_{aire}\omega_e + \dot{m}_{reposició} = \dot{m}_{aire}\omega_s \quad (\text{Eq. 2.2})$$

On:

$\dot{m}_e$  = Flux màssic de l'aire a l'entrada de la torre.

$\dot{m}_s$  = Flux màssic de l'aire a la sortida de la torre.

$\dot{m}_{aire}$  = Flux màssic de l'aire a través de la torre.

$\omega_e$  = Humitat absoluta del flux d'aire a l'entrada.

$\omega_s$  = Humitat absoluta del flux d'aire a la sortida.

$\dot{m}_{reposició}$  = Flux d'aigua nova que s'introdueix al circuit per suplir les pèrdues per evaporació.

Finalment, el balanç d'energia, que és el que més s'utilitzara per als càlcul d'aquest projecte, s'explicarà més endavant. Els altres dos balanços, tot i no ser utilitzats directament en el càlcul, s'emplearan per dur a terme les hipòtesis.

## 2.2. Bombes hidràuliques

### 2.2.1 Definició

Una bomba és una màquina hidràulica que intercanvia energia entre un fluid incompressible i l'entorn, convertint energia mecànica en hidràulica. A l'incrementar l'energia del fluid, s'augmenta la seva pressió, la velocitat o l'altura, totes elles relacionades mitjançant el Principi de Bernoulli. En general s'utilitza per incrementar la pressió d'un líquid afegint energia al sistema hidràulic per moure el fluid d'una zona de menor pressió a una de major [3].

### 2.2.2. Tipus de bombes

Les màquines hidràuliques, i en conseqüència les bombes, es poden classificar segons diversos criteris, però donat que al llarg del projecte el fluid de treball que circula per les canonades és l'aigua, les classificarem segons el principi de funcionament.

- **Bombes volumètriques o de desplaçament positiu**

Treballen mitjançant volums confinats. És el que s'anomena principi del desplaçament positiu: aïllar, desplaçar (comprimir) i expulsar [5]. Es produeix un omplert i buidat periòdic d'una serie de cambres, produint-se el tràfec de quantitats discretes de fluid des de l'aspiració fins la impulsió.

Algunes de les seves característiques són que treballen a pressions grans i cabals petits, i que existeix poca dependència del cabal amb l'altura resistent del circuit.

- **Bombes rotodinàmiques**

Transferència d'energia per la variació del camp de velocitats produït en el rodet. Entreguen el cabal de forma constant des de l'entrada, anomenada aspiració, fins la sortida o impulsió.

A diferència de les volumètriques treballen a pressions baixes i cabals grans, i el cabal si que depèn de l'altura resistent del circuit.

Segons la direcció del flux de sortida poden ser centrífugues, axials o semiaxials. El flux d'entrada sempre serà en la direcció de l'eix (radial).

- *Centrífugues*: el flux a la sortida del rodet té direcció perpendicular a l'eix (flux radial). A més, donen pressions elevades, dins del rang de funcionament de les bombes rotodinàmiques, amb altures de fins a 200m per etapa i cabals baixos.
- *Axials*: la direcció del flux a la sortida és paral·lel a l'eix (flux axial). Pressions baixes amb altures de fins a 20m i cabals elevats.
- *Semiaxials*: el flux entra en la direcció de l'eix, mentre que a la sortida és un intermig entre radial i axial, l'anomenat flux mixt. De la mateixa manera, també donen pressions i cabals mitjos.

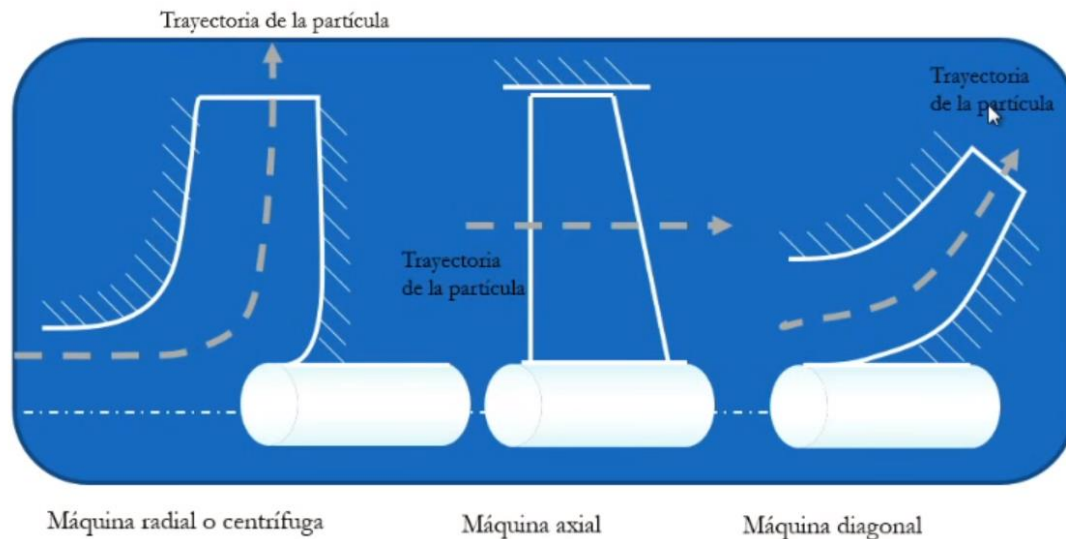


Figura 2.5. Imatge esquemàtica de la trajectòria que pren el cabal en l'entrada i en la sortida de cada tipus de bomba rotodinàmica.

El conjunt de les bombes Johnson-Pump model CombiNorm 80-160 que s'utilitzen al circuit hidràulic estudiat, són bombes centrífugues horitzontals. Notis que la classificació horitzontal/vertical és segons la col·locació de l'eix, fet que només serà influent a l'hora del muntatge.

### 2.2.3. La bomba centrífuga

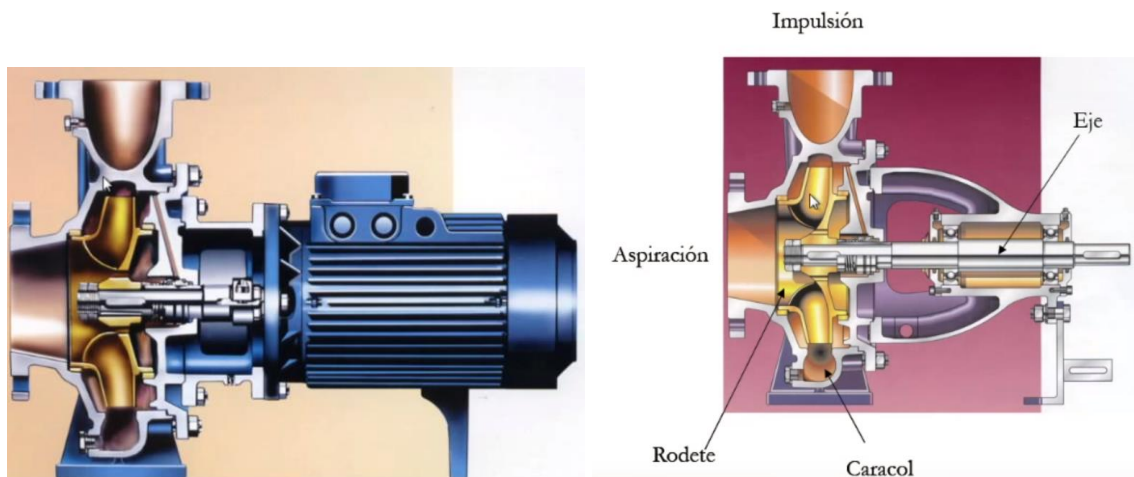
Per entendre millor el funcionament i els posteriors càlculs d'aquest estudi, s'explicarà amb més detall el funcionament i les parts d'una bomba centrífuga horitzontal.

- **Cambra d'aspiració:** en l'aspiració trobem la cambra d'aspiració. És important que el flux entri com s'espera, en la direcció axial i no tingui pèrdues que favoreixin la cavitació donat que és un dels punts amb menor pressió de la instal·lació.
- **Rodet:** és possiblement la part més important, ja que en ell el fluid guanya pressió, i és el responsable de la transformació energètica que té lloc a la màquina. És a dir, transmet el seu moment cinètic a les partícules, que canviaran velocitat per pressió a mesura que avancen pel rodets des de la zona central fins a la sortida.
- **Difusor:** és un element estàtic que es troba al voltant del rodets. Només present en algun tipus de bombes.
- **Voluta:** darrere del difusor, trobem la voluta o cargol, que serveix per recollir totes les partícules amb un criteri de velocitat constant i treure-les cap a la impulsió. És important que no es produeixin pèrdues hidràuliques en ell i es sol dissenyar per a que la velocitat sigui constant en tot moment, és per això que la seva secció creix.



- *Elements electromecànics*: juguen un paper fonamental en el funcionament complet de la màquina. Entre ells es troben l'eix, els rodaments o el motor entre d'altres.

La bomba centrífuga és indiscutiblement una de les més utilitzades per a les estacions de bombeig, sobretot en aigües netes [6].



Figures 2.6 i 2.7. A l'esquerra imatge esquemàtica del perfil d'una bomba centrífuga. A la dreta esquema amb les seves parts d'una bomba centrífuga.

#### 2.2.4. Les bombes en un circuit. Base del càlcul

El funcionament de les bombes dins d'un circuit hidràulic representa l'altura i el cabal que les propies màquines proporcionaran en una instal·lació concreta. Aquest cabal i altura venen determinades per les capacitats de la bomba i per les característiques de la pròpia instal·lació.

Existeixen dues corbes en un circuit hidràulic que permeten marcar el punt de funcionament del circuit. La corba motriu i la corba resistent. La igualació d'aquestes dues corbes proporciona l'altura i el cabal que es tindrà per a aquella instal·lació.

##### **Corba resistent del circuit:**

Depèn de les característiques de la pròpia instal·lació. Representa l'altura total requerida per la instal·lació en funció del cabal. Això és, la cota geomètrica que es vol elevar l'aigua, més la característica resistent en funció de les pèrdues que aquesta instal·lació tingui multiplicada per  $Q^2$ . Es representa segons l'expressió:

$$H^r = H_g + kQ^2 \quad (\text{Eq. 2.3})$$



On  $H_g$  representa l'altura geomètrica,  $k$  la característica resistent en funció de les pèrdues de la instal·lació i  $Q$  el cabal.

$k$  depèn de les característiques de la instal·lació com poden ser la longitud, el diàmetre i la rugositat de la canonada, i també de components del circuit tals com colzes o vàlvules entre d'altres. És a dir,  $k$  agrupa els dos tipus de pèrdues existents en una instal·lació hidràulica: les pèrdues lineals ( $k_{lin}$ ) i les pèrdues singulars ( $k_{sing}$ ).

- Pèrdues de càrrega lineals:

Les pèrdues de càrrega lineals en un conducte són degudes a la fricció del fluid contra ell mateix i contra les parets de la pròpia canonada.

*Es descriu la pèrdua de càrrega total d'una conducció en funció del cabal a partir de la fórmula de Darcy-Weisbach (Frank M. White, 1983):*

$$h_{lin} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \text{on} \quad v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Substituint, s'obté:

$$h_{lin} = f \frac{L}{D} \frac{1}{2g} \frac{16Q^2}{\pi^2 D^4} = f \frac{8L}{\pi^2 g D^5} Q^2 \quad (\text{Eq. 2.5})$$

I per tant, si  $h_{lin}=k_{lin}Q^2$ , el coeficient característic  $k_{lin}$  serà:

$$k_{lin} = f \frac{8L}{\pi^2 g D^5} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

On:

$L$  = longitud de la canonada

$D$  = diàmetre de la canonada

$g$  = gravetat

$v$  = velocitat del fluid que circula dins la caonada

$f$  = paràmetre adimensional que és funció del nombre de Reynolds i de la rugositat relativa de la tuberia

- Pèrdues de càrrega singulars:

Les pèrdues de càrrega singulars són produïdes per qualsevol obstacle en la canonada que obstrueixi el pas del fluid. Habitualment són petites en comparació amb les pèrdues lineals llevat que es tracti de vàlvules pràcticament tancades [7]. És defineixen mitjançant l'expressió:

$$h_{sing} = \xi \frac{v^2}{2g} = \frac{8 \xi}{g\pi^2 D^4} Q^2 \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Coneixent que,  $h_{sing} = k_{sing} Q^2$ , el coeficient característic  $k_{sing}$  serà:

$$k_{sing} = \frac{8 \xi}{g\pi^2 D^4} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

On  $\xi$  és el denominat coeficient de pèrdues singulars i la resta de paràmetres mantenen la nomenclatura de les expressions anteriors.

A diferència de les pèrdues de càrrega lineals, són molt difícils de calcular analíticament. Només es poden determinar de forma experimental. El coeficient  $\xi$  depèn del tipus de singularitat i de la velocitat mitjana a l'interior de la tuberia, i existeixen taules amb els seus valors per a cada tipus de singularitat trobats experimentalment.

En definitiva, per poder emprar l'equació X en una instal·lació en que es vulguin conèixer les altures i els cabals de les bombes, caldrà calcular abans  $H_g$  i  $k = k_{lin} + k_{sing}$ .

Es pot canviar el pendent de les corbes resistents de la instal·lació modificant l'obertura de la vàlvula. El pendent creix quan es tanca la vàlvula, obtenint així un punt de funcionament amb menys cabal i més alçada, mentre que obrint-la, s'aconsegueix el comportament oposat.

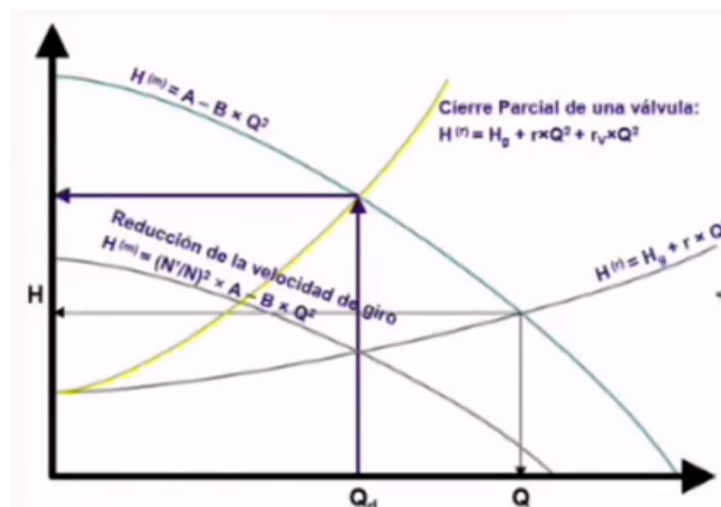


Figura 2.8. Figura X. Gràfic Q-H d'una bomba centrífuga on es mostren les corbes resistent i característica.

## Corba característica de la bomba

Cada model de bomba té un comportament diferencial que es reflexa en les seves corbes característiques. Aquestes corbes relacionen, per a un valor determinat del nombre de revolucions  $n$ , l'altura manomètrica ( $H$ ), el rendiment ( $\eta$ ) o la potència ( $N$ ) amb el cabal ( $Q$ ). De manera que en aquests gràfics el cabal sempre s'ubicarà en l'eix d'abscisses i els altres quatre valors en l'eix d'ordenades.

Per al diagrama Q-H, que és el que s'emplegarà en aquest projecte, la corba característica genèrica a utilitzar serà:

$$H = A - BQ^2 \quad (\text{Eq. 2.9})$$

On  $H$  i  $Q$  són respectivament l'alçada i el cabal al que treballa la bomba en una situació determinada, i  $A$  i  $B$  són coeficients constants, propis del model i de les condicions a les que treballa la bomba (diàmetre del rodet, velocitat de gir del motor...).

Les corbes són proporcionades pels fabricants a una velocitat de rotació determinada ( $n$ ) i per a un diàmetre concret del rodet. Els coeficients  $A$  i  $B$  es calculen per mitjà de mètodes experimentals en un banc de proves. Habitualment, el fabricant presenta més d'una corba característica per model, mostrant també les pertanyents a un o dos diàmetres de rodet extrems i a una o dues velocitats del motor més (veure Figura 2.9). Donat que no és factible realitzar in comptables assajos per a poder oferir el comportament de la bomba per a qualsevol règim de velocitat, el mateix usuari podria obtenir aquestes corbes mitjançant l'anomenada Llei de Semblança.

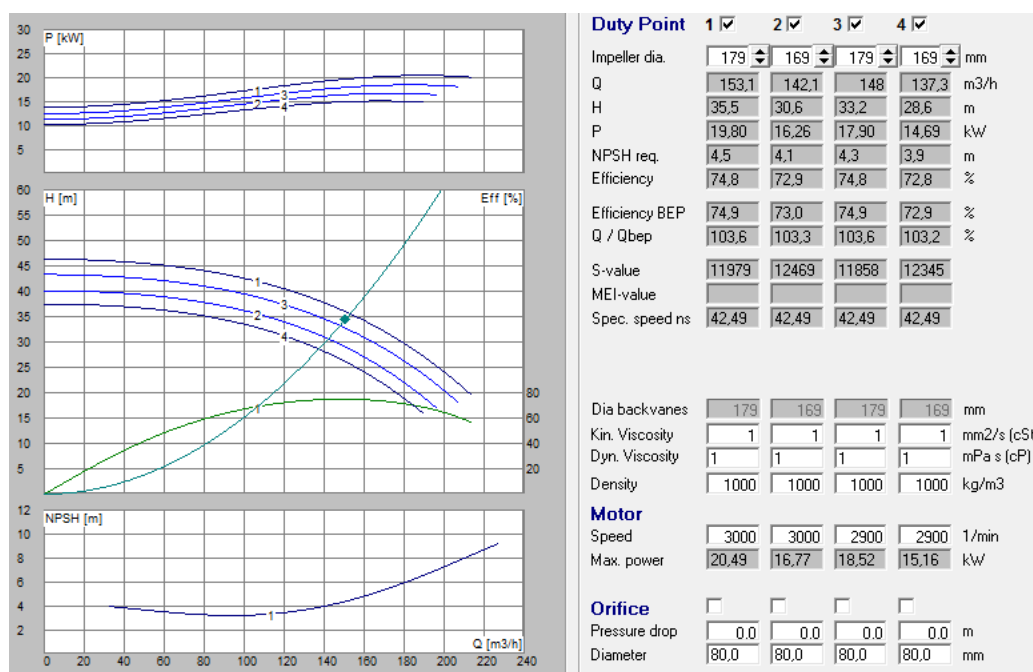


Figura 2.9. Imatge del software HI amb quatre de les corbes característiques d'interès.

- *Llei de Semblança per a bombes:*

La Llei de Semblança per a les bombes centrífugues permet conèixer el comportament de les bombes en altres condicions diferents de les ja conegudes.

Basats en els denominats criteris de semblança entre bombes, que engloba la semblança geomètrica, cinemàtica i dinàmica, és possible obtenir la corba característica d'una bomba que és geomètricament semblant a una altra i de la qual es coneix la corba característica.

Imposant igualtat dels paràmetres adimensionals més importants en bombes hidràuliques (coeficient de pressió i coeficient de cabal), s'arriba a:

$$\frac{Q_{n_1}}{Q_{n_2}} = \lambda^3 \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$\frac{H_{n_1}}{H_{n_2}} = \lambda^2 \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (\text{Eq. 2.11})$$

On  $\lambda$  = relació de semblança geomètrica =  $\frac{D_1}{D_2}$ , i en condicions de semblança total entre bombes, es fixen els diàmetres del rodet i es simplifiquen les relacions considerablement ( $\lambda = 1$ ).

Si la bomba utilitzada com a patró, treballant a una velocitat de gir  $n_1$ , presenta la corba característica (Eq. 2.12), per a trobar la corba característica d'una altra bomba geomètricament semblant que gira a diferent velocitat, s'empra l'equació (Eq. 2.13). Aquesta equació s'obté substituint les relacions (Eq. 2.10) i (Eq. 2.11), en l'expressió (Eq. 2.12).

$$H_{n_1} = A - BQ_{n_1}^2 \quad (\text{Eq. 2.122})$$

$$H_{n_2} = A \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - BQ_{n_2}^2 \quad (\text{Eq. 2.13})$$

El coeficient B serà sempre constant per a un model de bomba, però l'ordenada a l'origen variarà si es modifica la velocitat de gir del motor.

### 3. Modelització del circuit. Metodologia i càlculs

Partint dels fonaments teòrics explicats al capítol anterior, al llarg de les pàgines que segueixen es detallaran tots els càlculs i metodologies emprades en la modelització de la instal·lació hidràulica de la planta d'estudi.

Aquest capítol es divideix en dos grans subcapítols referents a les torres de refrigeració i a les bombes hidràuliques. Per a cadascun d'ells, s'explicarà com s'han obtingut les dades, quines són les hipòtesis preses i el procediment utilitzat per a realitzar els càlculs.

En resum, s'agafaran les bases de càlcul explicades en l'apartat de fonaments teòrics i es particularitzaran per al cas d'estudi.

#### 3.1. Modelització de les torres

Es modelitza en aquest apartat una de les dues torres EWK-900/09 instal·lades a la planta per tal de calcular finalment el cabal que circula a través d'ella. Donat que les dues torres EWK-900/09 són pràcticament iguals i que els cabals que arriben a cadascuna d'elles en cada instant són idèntics, només es farà el càlcul per a una de les dues. Més tard s'extrapolarà aquest resultat a l'altra per poder realitzar l'anàlisi complet.

##### 3.1.1. Obtenció de les dades

Les dades requerides per calcular el cabal que circula a través d'una torre de refrigeració són l'entalpia de l'aire a l'entrada, l'entalpia de l'aire a la sortida, el cabal d'aire sec, la calor específica de l'aigua, i la temperatura de l'aigua a l'entrada i a la sortida.

Si bé la calor específica de l'aigua és una constant tabulada, les altres dades s'han hagut d'obtenir de les bases de dades de l'empresa i no totes elles s'obtenen de forma directa. L'empresa registra diàriament mitjançant un sistema informàtic dades de temperatures d'aigua i del funcionament de les bombes.

Directament, s'obtenen les temperatures de l'aigua a l'entrada i a la sortida de les torres de refrigeració, així com el cabal d'aire sec. Les primeres es monitoritzen a través d'uns sensors a l'entrada i a la sortida de les torres cada certs intervals de temps programables, mentre que el cabal d'aire sec es calcula en inspeccions rutinàries. Les inspeccions són realitzades per l'empresa encarregada del manteniment de les torres cada cert període de temps amb instruments de mesura propis.

Tanmateix, trobar les entalpies de l'aire a l'entrada i a la sortida no resulta tant trivial, ja que s'han de calcular a partir de les equacions de l'entalpia o d'un diagrama psicromètric. Tots dos mètodes permeten calcular l'entalpia total de l'aire a partir de la temperatura de seca de l'aire

i de la humitat absoluta. Aquestes humitats, a la seva vegada es calculen a partir de la pressió, de la humitat relativa i de la temperatura de l'aire sec, que si que s'han pogut monitoritzar per mitjà d'una estació meteorològica.

L'explicació del càlcul de les entalpies i de les humitats absolutes es durà a terme més endavant, en l'apartat 3.1.4.

### 3.1.2. Tractament de les dades

El sensors que registren les temperatures a l'entrada i a la sortida de les torres de refrigeració prenen mesures les 24h del dia en els intervals de temps estipulats per l'enginyer responsable de la instal·lació. Aquestes dades es van acumulant en un fitxer que agrupa totes les dades de la setmana. Cada dilluns, s'esborren les dades de la setmana anterior i s'inicia un nou fitxer.

Per poder dur a terme l'anàlisi desitjat s'ha hagut de treballar amb grans bases de dades, mantenint contacte directe amb l'empresa per a obtenir-les. Es pacta amb els responsables de manteniment un dia per al qual es vulguin prendre les dades, per tal que es puguin monitoritzar totes les variables que es necessiten. És necessari realitzar un estudi previ per determinar de quines variables es necessitaran dades per poder executar l'anàlisi.

El fitxer .csv obtingut són les dades de les temperatures de l'aigua per tota la setmana que es es presenten en el format següent:

VarName	TimeString	VarValue	Validity
Sala Nord\DB_VentiladorsNord.Temperatura_SP	06/12/2017 10:14	20	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:14	19,85677	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:14	23,02517	1
Sala Nord\DB_VentiladorsNord.Temperatura_SP	06/12/2017 10:15	20	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:15	19,83507	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:15	23,09028	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:16	19,87847	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:16	23,09028	1
Sala Nord\DB_VentiladorsNord.Temperatura_SP	06/12/2017 10:17	20	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:17	19,94358	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:17	23,28559	1
Sala Nord\DB_VentiladorsNord.Temperatura_SP	06/12/2017 10:18	20	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:18	20,03038	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:18	23,19879	1
Sala Nord\DB_VentiladorsNord.Temperatura_SP	06/12/2017 10:19	20	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:19	20,13889	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:19	22,91667	1
Sala Nord\DB_VentiladorsNord.Temperatura_SP	06/12/2017 10:20	20	1
Sala Nord\DB_TemperatSortidaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:20	20,22569	1
Sala Nord\DB_TemperatEntradaNord.Temperatura_PV	06/12/2017 10:20	22,69965	1

Figura 3.1. Arxiu de dades .csv facilitat per l'empresa plàstics laminats.

*VarName* indica la procedència de la dada, que pot ser temperatura a l'entrada de la torre, temperatura a la sortida, o *SetPoint*, que és la temperatura nominal a la que està programada la instal·lació ( $T_N$ ). *Time String* és la data i l'hora en el format DD/MM/YYYY HH:MM, *VarValue* el valor de la variable i *Validity* no és rellevant per a l'anàlisi.

Aquestes grans bases de dades s'han de tractar mitjançant comandes Excel per obtenir dades amb les que sigui possible realitzar els càlculs i que estiguin en el format desitjat. S'exporten l'hora i els valors de les temperatures d'entrada i sortida cada 10 minuts en un nou fitxer amb aquestes tres mateixes columnes mencionades (Hora,  $T_e$ ,  $T_s$ ). Malgrat les dades de la temperatura de l'aigua siguin cada minut, les de la resta de paràmetres monitoritzats no ho són. És per aquest motiu que s'ometen les dades de les 10:17, 10:18, 10:19...

Les dades del cabal de l'aire es troben en documentació facilitada per l'empresa sobre les inspeccions rutinàries que es fan a les torres. Aquest documents contenen mesures preses en diferents paràmetres de la instal·lació (entalpia, temperatures, pèrdues de càrrega...). Si es pren com a vàlida la hipòtesi de cabal d'aire constant en una torre de refrigeració de tir induït, la mitja de les mesures del cabal de l'aire preses en els mesos de tardor donaran una aproximació d'aquest paràmetre. Aquesta hipòtesi s'explica en l'apartat 3.1.3.

La pressió atmosfèrica, la humitat relativa i la temperatura seca de l'aire es prenen a partir d'un aparell de mesura que ofereix dades cada 10 minuts. Això és el que determinarà la freqüència amb la que es prendran la resta de les dades i amb la que es faran els càlculs. En altres paraules, es calcularan els cabals d'aigua cada 10 minuts.

Per últim, remarcar que degut a que els aparells de mesura de les temperatures, pressions i humitats de l'aire tenen precisió de només un decimal, tots els càlculs per a trobar el cabal de l'aigua es faran també amb un decimal.

### 3.1.3. Hipòtesis

Els balanços de massa i d'energia en una torre de refrigeració acostumen a ser complexos ja que tenen moltes entrades i sortides. Per aquest motiu resulta necessari dur a terme hipòtesis que en simplifiquin el seu ús.

El balanç del flux màssic de l'aire no presenta cap simplificació especial respecte les seves entrades o sortides, i es seguirà mantenint  $\dot{m}_a$  constant al llarg de la torre. La hipòtesi que es pren respecte ell té a veure amb les dades obtingudes, i és que observant les inspeccions rutinàries realitzades a la torre en mesos de tardor, el cabal d'aire és pràcticament idèntic en totes elles. S'assumeix per tant la hipòtesi de que el cabal d'aire sec és constant en una torre de tir induït prefabricada.

No obstant, pel d'aigua sí que s'han dut a terme hipòtesis simplificatives. Primerament, donat que el cabal d'aigua utilitzat pels càlculs és sempre instantani, no es tindrà en compte la



quantitat d'aigua que es perd per evaporació, ja que aquesta és mínima. De la mateixa manera, tampoc es tindrà en compte l'aigua de reposició introduïda al circuit. Així doncs, el cabal d'aigua també serà constant a l'hora de fer els càlculs.

$$\dot{m}_{aigua_{entrada}} = \dot{m}_{aigua_{sortida}} = \dot{m}_{aigua} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Els balanços d'entalpia queden simplificats per les pròpies hipòtesis realitzades sobre el flux màssic i el d'aigua. No obstant, serà necessari fer hipòtesis pel procés d'obtenció de dades.

Les mesures d'humitats absolutes venen donades a partir de les pressions atmosfèriques, les temperatures seques de l'aire i la humitat relativa. En l'entrada de la torre, s'han pogut monitoritzar totes aquestes dades, mentre que en la sortida s'han pogut mesurar totes excepte la humitat relativa. S'ha suposat doncs, que la humitat relativa de l'aire a la sortida d'una torre de refrigeració és del 100%. Això és assumible ja que l'aire de l'entrada es carrega de gotes quan entra en contacte amb el flux d'aigua pulveritzada al rebliment de la torre, sortint a l'atmosfera saturat o pràcticament saturat. Per a un aire saturat, la temperatura de l'aire sec i la de l'aire humit són sempre coincidents. (Veure Figura A.1)

Finalment, per dur a terme aquests càlculs d'humitat absoluta i entalpies, s'ha considerat que tot i que la planta industrial es troba a una regió ubicada a uns 100m d'alçada, es pot utilitzar el diagrama psicromètric a la pressió atmosfèrica a nivell de mar.

Per completar l'estudi analític del fenomen de refredament evaporatiu que té lloc dins la torre, cal tenir en compte les següents hipòtesis simplifícatives:

- No hi han pèrdues de calor entre la torre i l'exterior.
- Tota la calor s'intercanvia en el rebliment.
- La calor específica de l'aigua que entra a la torre o en surt és constant ja la variació de temperatura que pugui tenir el fluid afecta mínimament a la constant.

#### 3.1.4. Metodologia de càlcul

La metodologia utilitzada per trobar el cabal que circula a través de la torre de refrigeració EWK-900/09 serà el càlcul del cabal d'aigua per diferència d'entalpies. Això és trobar la calor que guanya el flux d'aire desde que entra a la torre fins que en surt, ja que aquesta serà la calor perduda per l'aigua.

Per aquest motiu es farà primer el balanç energètic de l'aire amb les seves entalpies d'entrada i sortida, i seguidament es podrà fer el de l'aigua per trobar el paràmetre incògnita  $Q_{ewk}$ . No es tenen en compte les pèrdues de calor al llarg del procés ja que es considera la torre de refrigeració com un intercanviador perfecte.



Abans però caldrà conèixer les humitats absolutes (obtingudes a través del diagrama psicromètric) i els valors de les entalpies d'entrada i de sortida que es calcularan mitjançant les fórmules de l'entalpia total de l'aire atmosfèric [8].

### 3.1.5. Càlcul

Tenint les dades de les temperatures de l'aire sec, les humitats relatives i les pressions atmosfèriques, mesurades cada 10 minuts en l'entrada, s'obtenen els valors de les humitats absolutes també cada 10 minuts. Es fa a través del software Vaisala 5.0, un programa informàtic que fa la funció d'un diagrama psicromètric permetent fixar fins a tres paràmetres termodinàmics.

A través de les fórmules de l'entalpia total de l'aire atmosfèric es calcula l'entalpia de l'aire sec a l'entrada. Les equacions utilitzades són les següents [8]:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$h = h_a + \omega h_v \quad \text{en } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ aire sec} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

On  $h_v$  es considera l'entalpia del vapor saturat a la temperatura de la mescla (gas ideal). Es pot obtenir o bé per taules o bé mitjançant l'equació següent:

$$h_v \cong h_{v,sat} \cong 2500,9 + 1,82 T \text{ (en } ^\circ\text{C)} \quad (\text{kJ/kg vapor d'aigua}) \quad (\text{Eq. 13})$$

I  $h_a$  és l'entalpia de l'aire sec, que es pot determinar a partir de la capacitat calorífica a pressió constant i de la temperatura (gas ideal). Es descriu amb l'equació:

$$h_a = 1,005 T \text{ (en } ^\circ\text{C)} \quad (\text{kJ/kg aire sec}) \quad (\text{Eq.3.5})$$

Resulta important observar que en l'equació (Eq. 3.4) la humitat absoluta ha d'estar en g vapor d'aigua/kg d'aire sec, mentre que les dades obtingudes del psicromètric són en g vapor d'aigua/m<sup>3</sup> d'aire sec. Així doncs, és necessari aplicar el següent factor de conversió:

$$\frac{1 \text{ g de vapor d'aigua}}{\text{kg d'aire sec}} = \frac{1 \text{ g vapor d'aigua}}{\text{m}^3 \text{ d'aire sec}} \times \frac{1}{\rho_{\text{aire sec}}} \quad (\text{Eq. 14})$$

On la  $\rho_{\text{aire sec}}$  es calcula en kg/m<sup>3</sup> d'aire sec i depèn de les condicions atmosfèriques de pressió i temperatura. [Dades extretes de la taula "Propiedades del aire seco" del llibre

ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, “Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”, 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9].

Es repeteix el procés per a trobar les entalpies de l'aire sec a la sortida, amb la modificació de que a l'hora de calcular les humitats absolutes amb el psicromètric, es parteix de la hipòtesi d'aire saturat a la sortida (HR del 100%).

Mitjançant un full de càlcul s'han processat tots els càlculs explicats per al dia 8 de desembre de 2017 desde les 7 del matí fins les 21h en intervals de 10 minuts. Malgrat que el full sencer és massa extens i es troben a la Taula B.1.1 i B.1.2., es mostra a continuació un petit fragment de les mesures d'entrada:

General		Aire						
Hora	Pressió <i>P</i> hPa	Temperatura aire sec a l'entrada		Humitat relativa <i>HR1</i> %	Temperatura aire humit		Entalpia de l'aire sec a l'entrada <i>h1</i> kJ/kg aire sec	Temperatura aire sec a la sortida <i>Tas2</i> °C
		<i>Tas1</i> °C	<i>HR1</i> %		<i>Tah1</i> °C	<i>Habs</i> kg vap aigua/kg aire sec		
7:00	1022.9	5.2	71	3.2	4.9	0.004	14.7	7.7
7:10	1022.9	5.1	72	3.2	4.9	0.004	14.7	7.2
7:20	1022.9	4.9	72	3.0	4.9	0.004	14.3	6.7
7:30	1022.9	4.7	73	2.9	4.9	0.004	14.1	6.6
7:40	1022.9	3.9	74	2.2	4.7	0.004	13.0	4.7
7:50	1022.9	3.4	76	1.9	4.7	0.004	12.4	4.8
8:00	1022.9	2.9	78	1.5	4.6	0.004	11.8	5.8
8:10	1022.6	2.7	79	1.4	4.6	0.004	11.6	5.9
8:20	1022.9	2.4	80	1.2	4.6	0.004	11.2	5.2
8:30	1023.2	2.3	81	1.1	4.6	0.004	11.2	5.2
8:40	1023.2	2.3	82	1.2	4.7	0.004	11.3	5.4
8:50	1023.2	2.7	83	1.7	4.9	0.004	12.1	4.1
9:00	1023.2	3.3	82	2.2	5.0	0.004	12.9	5.2
9:10	1022.6	4.3	79	2.9	5.1	0.004	14.2	6.6
9:20	1023.2	4.9	76	3.3	5.1	0.004	14.9	7.3
9:30	1023.2	5.1	75	3.4	5.1	0.004	15.1	7.1
9:40	1022.9	5.1	76	3.5	5.1	0.004	15.1	6.6
9:50	1023.2	5.2	76	3.5	5.2	0.004	15.2	6.5
10:00	1022.9	5.4	76	3.8	5.3	0.004	15.7	7.3
10:10	1022.9	5.5	76	3.9	5.4	0.004	15.9	8.4
10:20	1022.9	5.8	75	4.1	5.4	0.004	16.2	7.5
10:30	1022.9	6.4	73	4.5	5.5	0.004	17.0	7.6
10:40	1022.9	6.8	71	4.7	5.4	0.004	17.4	7.2
10:50	1022.9	7.3	70	5.1	5.6	0.004	18.1	7.3
11:00	1022.9	7.6	69	5.3	5.6	0.004	18.4	9.3
11:10	1022.6	7.8	68	5.4	5.6	0.004	18.6	8.4
11:20	1022.6	7.9	68	5.5	5.6	0.004	18.8	9.8
11:30	1022.6	8.1	67	5.6	5.6	0.004	19.0	8.7
11:40	1022.6	8.3	68	5.9	5.8	0.004	19.5	8.7
11:50	1022.6	8.4	67	5.9	5.7	0.004	19.5	9.2
12:00	1022.2	8.7	67	6.1	5.8	0.004	20.0	10.6
12:10	1022.2	9	66	6.3	5.8	0.004	20.4	9.6
12:20	1022.2	9.2	66	6.5	5.9	0.005	20.7	9.7
12:30	1022.2	9.3	66	6.6	6.0	0.005	20.9	8.5
12:40	1021.9	9.4	66	6.7	5.9	0.005	21.0	10.3
12:50	1021.9	9.6	65	6.8	6.0	0.005	21.2	9.9
13:00	1021.9	9.7	65	6.9	6.0	0.005	21.4	10.1
13:10	1021.9	9.9	65	7.0	6.1	0.005	22.7	10.1

Figura 3.2. Captura de pantalla d'Excel. Mostra un fragment del full de càlcul on s'han efectuat tots els càlculs per l'entalpia i temperatura.

Amb les entalpies d'entrada i de sortida, es pot trobar la calor que guanya el corrent d'aire desde que entra a la torre fins que en surt, mitjançant el següent balanç energètic de l'aire:

$$q = \dot{m}_{\text{aire}} (h_2 - h_1) \quad (\text{Eq. 3.715})$$

On  $h_2$  i  $h_1$  són les entalpies en kJ/kg<sub>aire sec</sub> de l'aire a la sortida i a l'entrada de la torre respectivament, i  $\dot{m}_{\text{aire}}$  el flux d'aire sec que circula a través de la torre. Aquest flux es considera constant degut a la hipòtesi de cabal d'aire per a un torre de tir induït prefabricada i té un valor de 35 kg d'aire/s. S'obté aquest valor agafant les mesures rutinàries que realitza l'empresa encarregada del manteniment de la torre en els períodes de tardor i fent-ne la mitja aritmètica. Aquestes mesures es troben en els documents de medicació facilitats per l'empresa. El resultat del càlcul és de 34,89 kg d'aire/s (Taula B.1.3.), que s'arrodoneix a 35 kg d'aire/s per tal de simplificar els càlculs i els resultats (recordem que només es treballa amb precisió d'un decimal).

Per la seva banda, el balanç de l'aigua es determina a partir de l'expressió:

$$q = \dot{m}_{aigua} \cdot c_e \cdot \Delta T_{aigua} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

On  $\dot{m}_{aigua}$  és el flux màssic de l'aigua que circula per la torre i la incògnita de l'estudi.  $c_e$  és la calor específica de l'aigua, que és la quantitat de calor que es necessita per unitat de massa per elevar un grau Celsius la temperatura [9]. Té un valor de 4,18 kJ/kg °C que segons la hipòtesi de l'apartat 3.1.3 es considera constant. [10] I  $\Delta T_{aigua}$  és l'increment de temperatura que pateix l'aigua des que entra a la torre fins que en surt ( $T_1 - T_2$ ).

Aïllant  $\dot{m}_{aigua}$  s'obté el flux màssic de l'aigua que circula a través de la torre de refrigeració.

### 3.2. Modelització de les bombes

En el següent apartat, es modelitzen les tres bombes de retorn per trobar el cabal d'aigua que circula a través de cadascuna d'elles.

Prèviament a procedir amb el càlcul resulta fonamental recordar que totes tres bombes, que envien l'aigua del Dipòsit Intermig a les torres, són Johnson-Pump model CombiNorm 80-160 amb rodet de 180mm.

#### 3.2.1. Obtenció de les dades

Les dades obtingudes per cada bomba són aquelles que s'han monitoritzat en intervals de 10 minuts mitjançant una sèrie de sensors ubicats a l'entorn de cadascuna (canonades de sortida o sobre la pròpia bomba). Aquesta informació consisteix en la velocitat instantània de gir del motor, en el parell del motor (les dues magnituds expressades en tants per cents) i en el cabal d'aigua.

Les dades, de la mateixa forma que passa amb les dades de la temperatura de l'aigua, s'acumulen en un fitxer .csv que es reinicia cada setmana. Novament, cal parlar amb els operaris de manteniment de la instal·lació per a obtenir aquest fitxer per al dia desitjat.

Paral·lelament, a partir de les fitxes tècniques de les bombes proporcionades pel fabricant, es poden extreure tant les característiques nominals, com les corbes característiques. Les fitxes mostren un nombre de corbes reduït pertanyents a dos o tres diàmetres de rodet molt concrets, que sovint no coincideixen amb el de les bombes de la instal·lació a estudiar. No obstant, com s'explica al capítol 2, es podran aconseguir mitjançant la Llei de Semblança.

A més, en el cas d'alguns fabricants, també es mostren intervals de corbes característiques amb la mateixa pendent per a cada velocitat de gir del motor. És a dir, abarçant tot el rang de rodets possibles per a cada model a una velocitat de gir en concret. Resultant aquests valors

massa ambigu. En la Figura 3.3 es poden observar perfectament aquestes regions per a cada model de bomba.

No totes les fitxes tècniques de les bombes han estat subministrades per l'empresa petroquímica, i algunes d'elles estaven obsoletes. S'han hagut d'obtenir les corbes característiques per altres mitjans.

### Curvas característiques

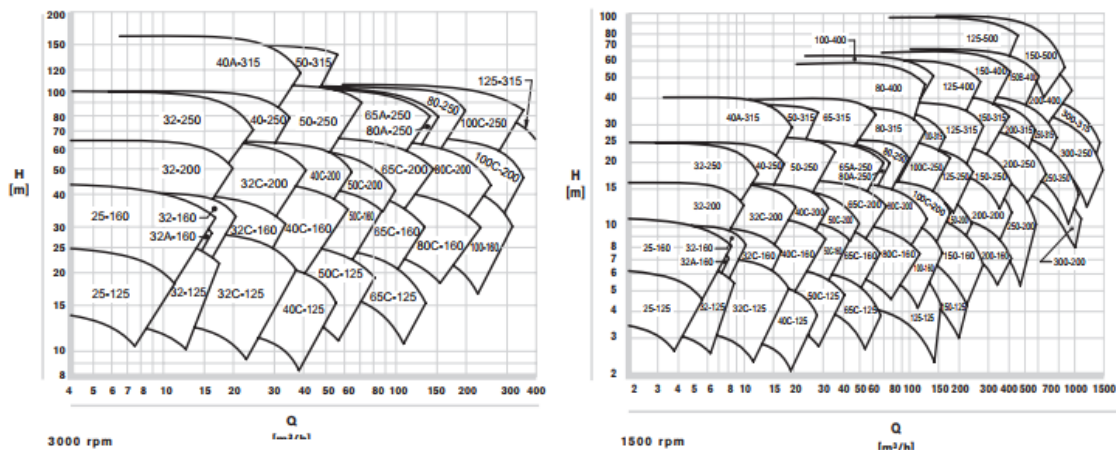


Figura 3.3. Grups de corbes característiques de les bombes marca Johnson Pump agrupades per model. Imatge obtinguda de : [http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/J\\_P\\_CombiNorm\\_413\\_03\\_03\\_2016\\_E.pdf](http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/J_P_CombiNorm_413_03_03_2016_E.pdf)

En aquest sentit, Johnson Pump habilita gratuïtament al seu lloc web el software Hydraulic Investigator 2. Aquest programari permet visualitzar qualsevol corba característica a partir de seleccionar una bomba i introduir els paràmetres que es vulguin fixar. Inicialment, es selecciona una de les múltiples famílies de bombes que tenen al seu catàleg i el seu model concret. Una vegada seleccionada es poden fixar paràmetres tals com la velocitat de gir del motor en rpm i el diàmetre del rodet, obtenint d'aquesta forma la corba desitjada. La interfície del software així com les corbes característiques per al model CombiNorm 80-160 CI (CI és Cast Iron que significa fundició de ferro) es mostren en la Figura 3.4.

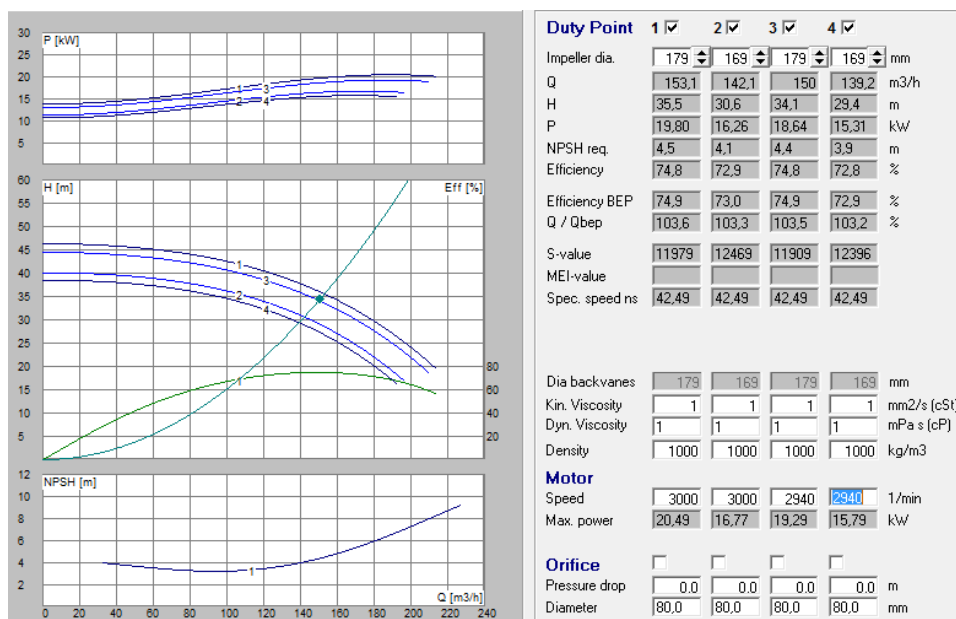


Figura 3.4. Corbes característiques per a la bomba Johnson Pump CombiNorm 80-160 amb els paràmetres “speed” i “impeller diameter” fixats.

Finalment, les dades del circuit hidràulic que es necessiten per al càlcul de la corba resistent s’han demanat directament a l’empresa d’estudi.

### 3.2.2. Tractament de les dades

Novament la base de dades del fixer .csv és molt extens i cal adaptar-la a les necessitats del projecte. Les dades adquirides tenen l’estructura que s’observa en la Figura 3.5.

VarName	TimeString	VarValue	Validity	Time_ms
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Velocidad_PV	08/12/2017 3:40	0	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Par_PV	08/12/2017 3:40	0	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Caudal_PV	08/12/2017 3:40	0	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Velocidad_PV	08/12/2017 3:50	21,81483	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Par_PV	08/12/2017 3:50	3,565201	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Caudal_PV	08/12/2017 3:50	0	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Velocidad_PV	08/12/2017 4:00	99,97887	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Par_PV	08/12/2017 4:00	86,82106	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Caudal_PV	08/12/2017 4:00	230,3776	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Velocidad_PV	08/12/2017 4:10	59,98665	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Par_PV	08/12/2017 4:10	20,91666	1	4,31E+10
Sala Nord\DB_Bomba2DiplIntermig.Caudal_PV	08/12/2017 4:10	113,4706	1	4,31E+10

Figura 3.5. Arxiu de dades .csv facilitat per l’empresa plàstics laminats

*VarName* indica la procedència de la dada, que pot ser velocitat de gir del motor, parell del motor o cabal que circula a través de la bomba. *Time String* és la data i l’hora en el format DD/MM/YYYY HH:MM, *VarValue* el valor de la variable i *Validity* no és rellevant per a l’anàlisi.

D'entrada pot sobtar el fet de tenir com a dada el paràmetre incògnita, però si s'entra a analitzar els valors de les dades, ràpidament es pot comprovar que els cabals són massa grans per a una bomba d'aquestes característiques. Una bomba centrífuga per a una instal·lació d'aquestes característiques difícilment presentarà cabals de l'ordre de  $230 \text{ m}^3/\text{h}$ . Si es visiten les instal·lacions de la fàbrica es pot observar que el sensor de pressió que calcula el cabal instantani està en un tram de la tuberia a una distància considerable després de la bomba. Entre la bomba i el sensor hi ha una vàlvula antiretorn amb grans pèrdues de pressió i colzes. A més, la secció de pas és molt gran, fet que provoca una disminució de pressió que a l'utilitzar-la com a entrada de la corba característica dona lloc a cabals massa grans. És per això que s'omet aquesta dada i es calcularà a través del mètode explicat al llarg del projecte.

Tant la velocitat de gir del motor com el parell estan expressats percentualment. Es considera el motor aturat i per tant que la bomba no està en ús, quan el sensor marca una velocitat de gir del 0%. Pel contrari, una velocitat del 100% implica que el motor està treballant a la capacitat nominal. No obstant, el monitor pot marcar velocitats de gir superiors al 100% en alguna ocasió.

Les dades del parell del motor no s'utilitzaran per a fer els càlculs, ja que també es calculen a partir del sensor de pressió que distorsiona les dades.

S'actua sobre la gran base de dades de la mateixa manera que s'ha fet amb les torres de refrigeració, per obtenir dades per a poder fer el càlcul del cabal. Es construeix una plantilla amb una columna per l'hora i una altra per la velocitat de gir del motor, on es realitzaran tots els càlculs.

### 3.2.3. Metodologia del càlcul

Els cabals que circulen a través de cada bomba en un instant determinat es troben per mitjà de la Llei de Semblança explicada al capítol de teoria.

Abans d'aplicar aquesta llei, però, s'haurà de fer el càlcul de les corbes resistent i característica per als valors nominals, amb les que alhora s'obté també el punt de funcionament nominal.

Es trobaran la resta de corbes característiques (una per cada velocitat instantània de gir del motor), i amb elles els punts de funcionament en cada instant. Obtenint així l'alçada i el cabal als que està treballant la bomba en tot moment.

Finalment, es comparen els cabals amb els obtinguts pel mètode del refredament evaporatiu.

Recordar que les dades de velocitat de gir del motor que subministra el sensor de la bomba són percentuals, i per tant s'hauran de passar a unitats del Sistema Internacional (rad/s en aquest cas) abans d'iniciar el càlcul.

### 3.2.4. Càlcul

Per a les dades tractades que s'han introduït a la plantilla dissenyada, resulta necessari passar-les velocitats de gir del motor a unitats del Sistema Internacional.

La velocitat de gir està expressada en percentatges respecte a la seva velocitat nominal, que és de 2940 rpm segons la fitxa tècnica proporcionada pel fabricant. Es multiplica el percentatge de la velocitat de gir del motor per la velocitat nominal i també pel factor de conversió de rpm o  $\text{min}^{-1}$  a rad/s ( $1 \text{ rpm} = 2\pi/60 \text{ rad/s}$ ).

Per a calcular la corba resistent, es vol trobar la funció que descriu exactament la instal·lació hidràulica d'estudi. Això es fa trobant els coeficients de l'equació següent:

$$H^r = H_g + kQ^2 \quad (\text{Eq. 3.9})$$

D'entrada  $H_g=13$ , que és l'altura geomètrica en metres que existeix entre la bomba i els pulveritzadors de les torres EWK-900/09. Mentre que  $k$ , per la seva banda, no es trobarà mitjançant l'expressió de Darcy-Weisbach més la de les pèrdues singulars, sinó que es farà pel mètode analític a partir de dos punts de funcionament. Així es té:

$$\text{Punt 1: } Q = 0; H = 13\text{m}$$

$$\text{Punt 2: } Q = 172,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; H = 33,2\text{m}$$

Si es resol l'equació (Eq. 3.9) pels dos punts de funcionament assignats, s'obté la corba resistent:

$$H^r = 13 + 0,000676 \cdot Q^2 \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Paral·lelament, es troba la corba característica a partir de la fitxa tècnica del fabricant, que o bé en proporciona l'equació explícitament, o bé ho fa a través d'un gràfic. Aquest darrer cas és el de Johnson Pump. De nou, mitjançant dos punts 3 i 4 i substituint-los en l'expressió :

$$H = A - BQ^2 \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$\text{Punt 3: } Q = 0; H = 42,5 \text{ m}$$

$$\text{Punt 4: } Q = 172,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; H = 33,2\text{m}$$

S'obté la corba característica nominal següent:



$$H = 42,5 - 0,000311 \cdot Q^2 \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Ha de quedar molt clar que aquesta és la corba nominal, i que per tant només serà vàlida a la velocitat nominal de gir del motor (2940 rpm). És per això que caldrà calcular mitjançant la Llei de Semblança la corba corresponent a cada velocitat instantània.

Com s'ha vist en la Figura 3.5 les corbes d'un mateix model i mateix rodet tenen presenten sempre la mateixa forma o curvatura, de manera que l'únic coeficient que s'ha d'adaptar al canviar les velocitats de gir és A. Això es fa amb l'expressió de Semblança (Eq. 3.13)

$$H_{n_2} = 42,5 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - 0,000311 \cdot Q_{n_2}^2 \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$n_1$  és la velocitat de gir nominal i  $n_2$  la velocitat instantània, mentre que  $H_{n_2}$  i  $Q_{n_2}$  són l'alçada i el cabal per a aquesta nova velocitat.

El punt de funcionament que permet conèixer el cabal i l'altura a la que treballa la bomba en cada instant s'obté de fer tallar aquesta corba amb la resistent. Donat la gran quantitat de dades que es tenen es resoldrà pel mètode analític enlloc del gràfic. Per a l'estudi realitzat interessa únicament el cabal instantani que es troba igualant les corbes:

$$H^r = 13 + 0,000676 \cdot Q^2 \quad (\text{Eq. 3.164})$$

$$H = 42,5 - 0,000311 \cdot Q^2 \quad (\text{Eq. 3.15})$$

I aïllant Q, s'obté:

$$Q = \sqrt{\frac{42,5 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - 13}{0,000987}} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Aquesta expressió és la que permet calcular a la plantilla de càlcul el cabal per a totes les dades preses cada 10 minuts.

Es repeteix tota aquesta operació per a cadascuna de les tres bombes, obtenint així el cabal instantani de cadascuna. Sumant-los els tres es té el cabal instantani total que circula per la instal·lació hidràulica.

Finalment, dividint aquest cabal total entre dos es pot comparar amb el trobat per una de les dues torres EWK-900/09.



#### 4. Resultats

Malgrat que resulta complicat exposar tots els resultats parcials i finals de l'anàlisi donat el seu gran volum, en el present capítol es farà la comparació entre els cabals obtinguts per mitjà d'un mètode i de l'altre.

Es buscarà extreure conclusions dels cabals comparats i del càlcul realitzat. Així com altres detalls que es puguin observar i es considerin rellevants.

Els resultats, tant intermitjos com finals, són molt voluminosos ja que prenent mesures cada 10 minuts des de les 7 del matí fins les 9 de la nit, apareixen grans quantitats de dades amb les que després s'ha d'operar. Per aquest motiu no es presentaran totes les taules de resultats al cos del treball sinó que es mostrarà un fragment, completat també mitjançant gràfics.

##### 4.1. Cabals obtinguts per cadascun dels mètodes

A continuació es presenten els resultats més importants que permeten entendre com s'ha arribat a la comparativa final de cabals. És a dir, aquelles que han permès executar els càlculs per a tota la gran base de dades, per mitjà del mètode de la diferència d'entalpies, i de la Llei de Semblança.

##### Bombes:

D'entrada s'obté el cabal per a cadascuna de les tres bombes que envien aigua del Dipòsit Intermig mitjançant la metodologia de corbes explicada al capítol anterior, per confeccionar finalment la taula de resultats. La taula 4.1 correspon a un fragment de la taula de resultats (Taula B.2), on es mostra el cabal instantani de cadascuna de les tres bombes i el sumatori total.

Data i Hora	Cabal Bomba 1	Cabal Bomba 2	Cabal Bomba 3	Cabal Total	Cabal que circula per una torre EWK-900/09
	$Q_{b1}$	$Q_{b2}$	$Q_{b3}$	$Q_{tot}$	$Q_{ewk}$
	$m^3/h$	$m^3/h$	$m^3/h$	$m^3/h$	$m^3/h$
08/12/2017 7:00	172,93	0,00	0,00	172,93	<b>86,46</b>
08/12/2017 7:10	172,97	0,00	0,00	172,97	<b>86,48</b>
08/12/2017 7:20	48,35	48,27	48,05	144,67	<b>72,34</b>
08/12/2017 7:30	48,30	48,40	48,38	145,08	<b>72,54</b>
08/12/2017 7:40	48,41	48,33	0,00	96,74	<b>48,37</b>
08/12/2017 7:50	48,06	48,18	0,00	96,24	<b>48,12</b>

08/12/2017 8:00	172,73	0,00	0,00	172,73	<b>86,37</b>
08/12/2017 8:10	172,79	0,00	0,00	172,79	<b>86,39</b>
08/12/2017 8:20	48,20	48,43	48,41	145,04	<b>72,52</b>
08/12/2017 8:30	48,29	48,38	48,04	144,71	<b>72,35</b>
08/12/2017 8:40	48,00	48,50	48,34	144,84	<b>72,42</b>
08/12/2017 8:50	48,15	48,42	0,00	96,57	<b>48,29</b>
08/12/2017 9:00	48,37	48,18	0,00	96,54	<b>48,27</b>

Taula 4.1. Fragment de la taula de càlcul del cabal que circula a través de cada bomba.

On  $Q_{b1}$  és el cabal de la primera de les tres bombes que porten aigua del Dipòsit Intermig a les torres,  $Q_{b2}$  és el cabal de la segona i  $Q_{b3}$  el de la tercera.  $Q_{tot}$  és el cabal total de la instal·lació, aquell que es troba quan s'uneix en una sola canonada l'aigua provinent de les tres bombes, i  $Q_{ewk}$  és el  $Q_{tot}$  dividit entre dos. És a dir, el cabal d'aigua que circula a través d'una de les dues torres EWK-900/09. El dia 8 de desembre ambdues es trobaven en funcionament i el cabal que circula per cadascuna d'elles se suposa idèntic.

Els resultats del  $Q_{ewk}$  calculats a la taula 4.1 es mostren d'una manera més visible a la Figura 4.1.

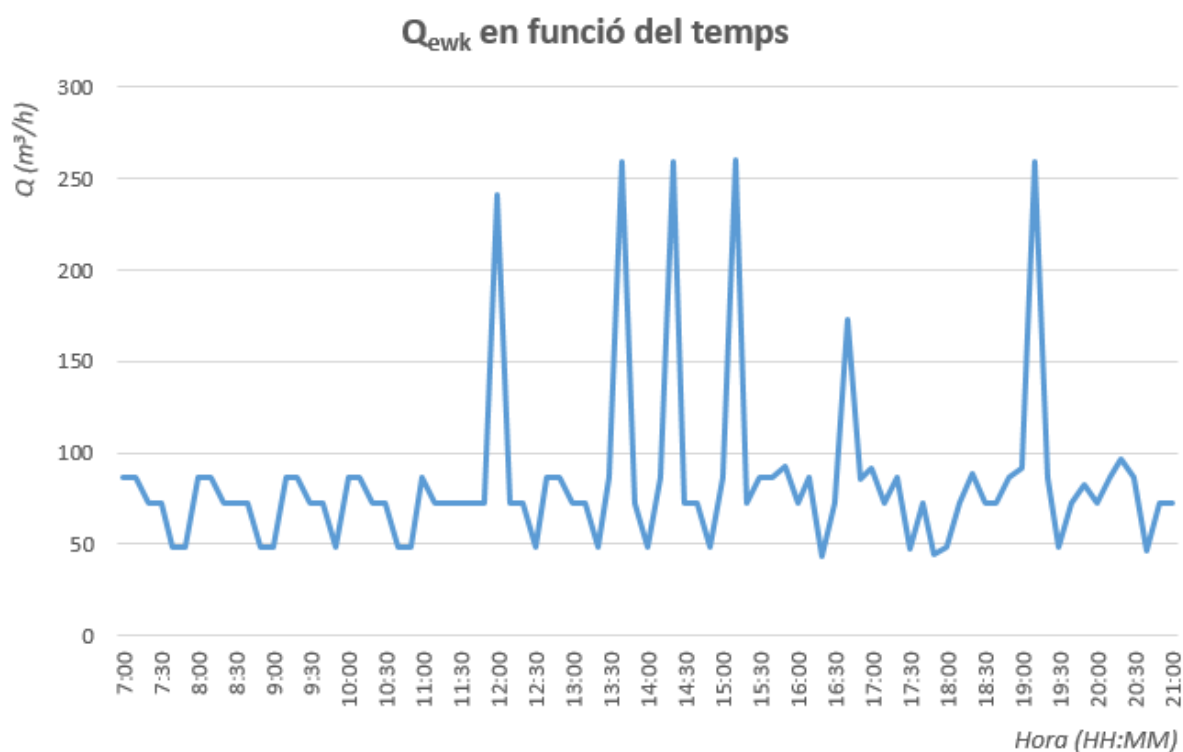


Figura 4.1. Gràfic del cabal d'una bomba a través de la torre de refrigeració EWK en funció del temps.

Malgrat que d'aquesta primera taula o gràfic no es poden extreure gaires conclusions significatives, si que hi han alguns detalls que salten a la vista i són importants de remarcar.

D'entrada s'observa a la taula B.2.1 que el cabal d'aigua impulsat per una bomba segueix uns certs nivells de funcionament, com si s'activés per mitjà d'un interruptor de quatre posicions. El cabal és nul quan la bomba està aturada, al voltant de  $48 \text{ m}^3/\text{h}$  quan actua a baixes velocitats de gir, de  $72 \text{ m}^3/\text{h}$  quan ho fa a velocitats mitges, de  $80\text{-}90 \text{ m}^3/\text{h}$  a mitges-altes, i de  $170\text{-}190 \text{ m}^3/\text{h}$  quan ho fa al màxim de la seva capacitat. Aquest comportament es trasllada obviament també al  $Q_{\text{tot}}$  i al  $Q_{\text{ewk}}$ . Els nivells de funcionament fan que la corba  $Q_{\text{ewk}}$  de la Figura 4.1 presenti un patró repetitiu al llarg del dia.

Un altre comportament que es pot veure, és que generalment, les bombes reparteixen la càrrega de treball per evitar que una treballi al 100% tota la jornada i estigui sobreexplotada. De la mateixa manera, si bé sempre existeix una bomba principal, una secundària i una terciària, aquests *rolls* varien al llarg del dia per no fatigar en excés la bomba principal. S'observa aquest fenomen ja que, per exemple, de les 7:00 fins les 15:30 la bomba 1 sempre està en funcionament i les altres dues es van activant i aturant segons la càrrega de treball, mentre que a partir de les 15:30 és la bomba 1 la que treballa o no en funció de la càrrega. I és la bomba 2 la que passa a ser la principal. El gràfic de columnes de la figura 4.2 detalla aquests percentatges de càrrega de treball per a cada bomba.

### % del cabal de cada bomba en funció del temps

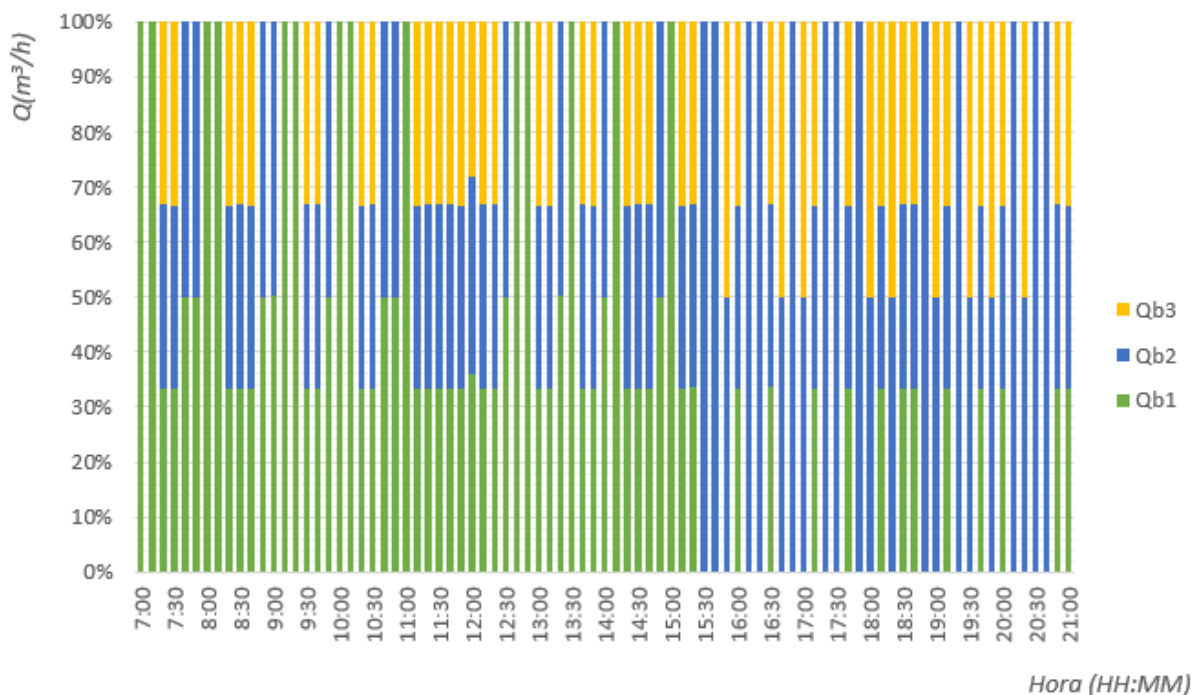


Figura 4.2. Diagrama del cabal de les bombes 1, 2 i 3. Per a cada columna es mostra el % de treball de cada bomba.

El motor de les bombes, com tot motor elèctric presenta un transitori quan oscil·la d'un punt de rendiment baix a un de rendiment alt. En el cas de les bombes Johnson Pump CN-80-160, aquest transitori és més aviat lent, de manera que s'ha d'anar molt en compte a l'hora de prendre dades. Ja que el fet de mesurar estats transitoris, podria distorsionar el resultat. Aquest cas s'ha donat molt explícitament per les mesures preses entre les 11 i les 12 del matí, malgrat que no s'observa ni al gràfic ni a la taula de resultats. En aquestes situacions es pretenia passar d'una bomba treballant a plena càrrega a tres treballant a càrregues parcials. En totes les mesures preses durant aquest interval de temps d'11 a 12 del matí, el conjunt de bombes actua de la manera següent. D'entrada es té la primera d'elles treballant a plena càrrega, moment en el que s'activa la segona (que es trobava a 0). A continuació, en estar la segona a la meitat del transitori comença a funcionar la tercera. Finalment, amb les tres bombes ja actives s'estabilitza el sistema amb elles treballant a nivells baixos, al voltant de  $48\text{m}^3/\text{h}$ .

Situacions com aquesta en que les tres bombes treballen a la mateixa càrrega de treball i cap d'elles al seu màxim cabal es donen també per repartir el desgast. No obstant, les bombes es dissenyen per treballar en un punt de funcionament (*bep: best efficiency point*), i fora d'aquest punt, les seves prestacions empitjoren. Tres bombes treballant a càrregues parcials no estan sotmeses a tanta exigència a nivell mecànic com ho estaria una sola treballant al 100%, però també cal tenir en compte que estiguin treballant en el seu rang òptim de funcionament..

Per últim, és important remarcar també l'existència de sis mesures del cabal molt per sobre de la resta (veure figura 4.1), on es troben les tres bombes impulsant aigua al 100% de la seva velocitat de gir nominal. Si bé no és la situació habitual, es poden donar aquestes situacions quan el Dipòsit Intermig té el nivell d'aigua massa alt o el Dipòsit Central no disposa d'aigua per bombejar a la maquinària. De manera que s'ha d'impulsar molta aigua de cop cap a les torres.

### Torre EWK-900/09

L'altre mètode de càlcul emprat, el de la diferència d'entalpies es mostra en la següent taula de resultats. On es representa el cabal instantani que circula a través d'una torre EWK-900/09 així com els resultats parcials més rellevants, tals com les entalpies, temperatures o la calor. Dins del cos del treball es presenta només un fragment de la taula total, que permet veure tres trams diferents del dia: matí, tarda i nit. Les entalpies de l'aire d'entrada i de sortida tenen comportaments diferents per a cadascun d'aquests trams.

Hora	AIRE			AIGUA			
	Entalpia			Flux calor	Temperatura		
	Entrada	Sortida	Variació	Calor	Entrada	Sortida	Cabal
	$h_1$	$h_2$	$\Delta H$	$q$	$T_e$	$T_s$	$Q_{ewk}$
	<i>kJ/kg aire</i>	<i>kJ/kg aire</i>	<i>kJ/kg aire</i>	<i>kJ/h</i>	<i>°C</i>	<i>°C</i>	<i>m³/h</i>
7:00	14,7	23,5	8,8	1107820,8	22,97	19,83	84,3
7:10	14,7	22,5	7,8	988222,8	22,33	19,84	94,7
7:20	14,3	21,5	7,1	898685,9	22,74	19,85	74,4
7:30	14,1	21,3	7,1	898673,5	22,82	19,80	71,3
7:40	13,0	17,6	4,7	587149,3	22,41	19,82	54,1
7:50	12,4	17,8	5,4	682064,6	22,90	19,82	53,0
13:00	21,4	28,5	7,1	899760,8	23,04	20,14	74,3
13:10	22,7	28,5	5,8	731550,5	22,49	19,90	67,5
13:20	22,9	26,6	3,7	470989,6	22,72	20,19	44,5
13:30	23,0	30,5	7,5	946879,6	22,59	19,88	83,5
13:40	22,8	34,3	11,5	1453983,5	22,20	19,97	155,9
13:50	22,9	30,3	7,4	927702,7	23,06	20,13	75,7
19:50	22,1	30,3	8,2	1032665,1	22,68	19,89	88,5
20:00	22,1	27,2	5,1	647166,9	22,47	20,12	65,9
20:10	22,1	31,2	9,1	1148773,1	23,03	19,92	88,4
20:20	22,1	30,5	8,4	1061569,5	22,68	19,95	93,0
20:30	22,1	27,7	5,6	701399,9	22,02	19,81	75,7
20:40	22,1	24,9	2,8	354703,0	21,69	19,84	45,8

20:50	22,1	26,4	4,3	539726,0	22,13	19,93	<b>58,9</b>
21:00	22,5	29,8	7,4	929143,0	22,77	19,94	<b>78,6</b>

Taula 4.3. Fragment de la taula del càlcul dels cabals a través de la torre EWK per mitjà del mètode d'entalpies

La taula consta d'unes primeres columnes referents als càlculs entàlpics i unes últimes referents a l'aigua que circula per la torre. Recordem que l'entalpia d'entrada ( $h1$ ) i sortida ( $h2$ ) s'han trobat a partir de les equacions i dades explicades al capítol anterior, i que les temperatures de l'aigua en l'entrada i la sortida s'han monitoritzat mitjançant termòmetres als dipòsits. Per la seva banda la calor  $q$  representa el flux de calor que guanya l'aire en entre l'entrada i la sortida.

Per facilitar la comprensió dels resultats sense haver de plasmar la taula, a la Figura 4.3 es mostra una gràfic de l'evolució del cabal al llarg del dia.

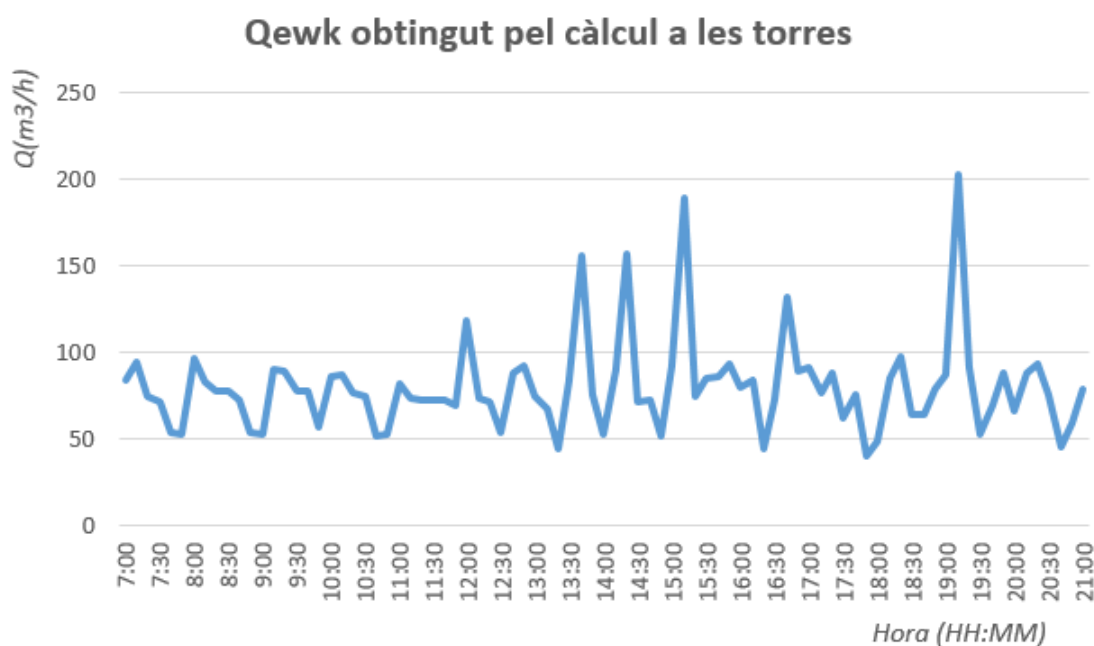


Figura 4.3. Gràfic del cabal total que circula a través d'una de les torres EWK-900/09 en cada instant de temps.

El primer que crida l'atenció quan es volen analitzar els resultats del cabal d'aigua que circula a través d'una de les dues torres EWK-900/09 presentats a la Figura 4.3 és que es mantenen els nivells bombeig d'aigua. Si bé no són tant marcats com en el cas dels cabals de les bombes, en el cas de les torres també es pot observar que els cabals d'aigua segueixen certs patrons. És a dir, es segueixen mantenint els grups de cabals al voltant dels 48 m³/h quan la torre actua a baixa capacitat, de 72 m³/h quan ho fa a la meitat de la seva capacitat, de 80-90 m³/h a mitja-alta, i de 170-190 m³/h quan ho fa al màxim de la seva capacitat.

Obviament això no és una casualitat, sinó que el fet de rebre més aigua dels dipòsits obliga a les torres a treballar a major nivell, de manera que l'entalpia de l'aire a la sortida augmentarà.

En conseqüència, quan es calcula el cabal per mitjà del mètode de les entalpies, el resultat es veurà afectat per aquesta casuística, donant un resultat coherent.

Respecte a les dades de la temperatura de l'aigua que es poden veure a la Figura 4.4, el més destacable és que el refredament del fluid pràcticament sempre és d'entre uns 2 i uns 4 °C, que la temperatura d'entrada oscil·la entre els 21 i els 24 °C, i que la temperatura de sortida es manté constant. Cal fer especial èmfasi en aquest últim punt, ja que és un dels objectius que es volien aconseguir quan es va implementar el controlador PID l'abril del 2017. El fet que la temperatura de sortida tingui una diferència màxima de 0,4-0,5 °C entre els valors més alts i els més baixos, demostra que la millora introduïda al circuit realment l'estabilitza. En altres paraules, que ara sí, es pot confiar en que si la temperatura nominal  $T_N$  del CSN és de 20 °C, aquesta es mantindrà constant i estable al llarg del temps.

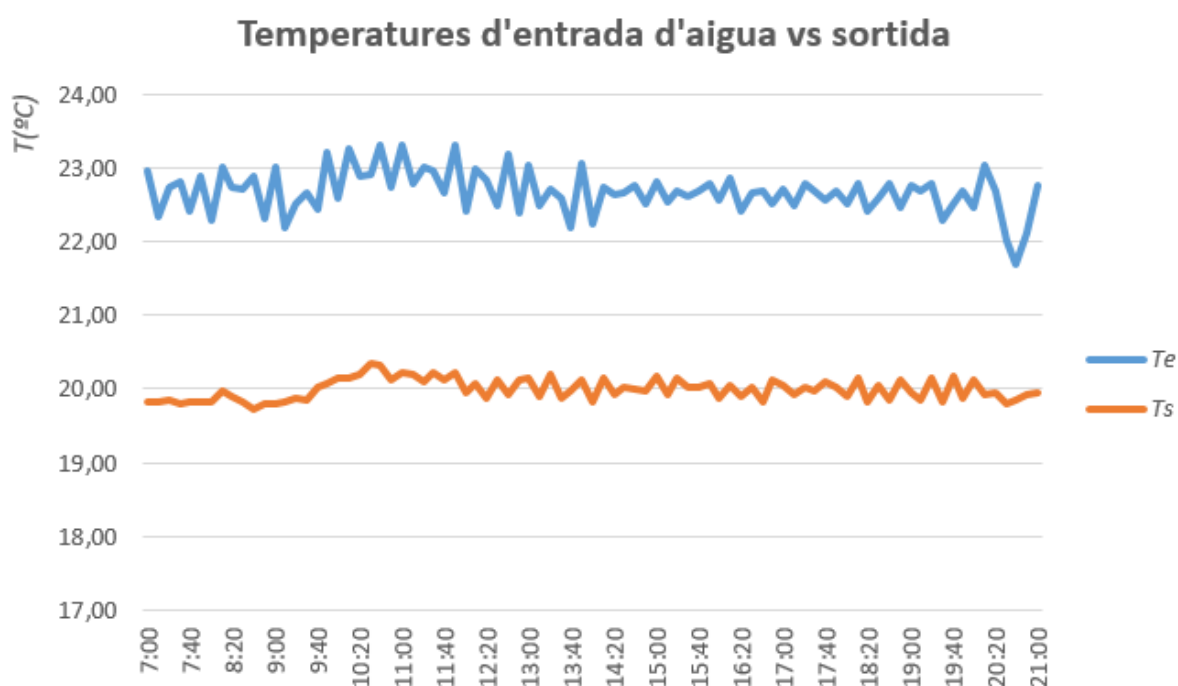


Figura 4.4. Gràfic comparatiu entre les temperatures d'entrada i sortida de l'aigua a les torres.

Finalment, pel que fa a les entalpies, observar que l'entalpia de l'aire a l'entrada sempre és menor que la de la sortida. Això passa perquè durant el transcurs del refredament evaporatiu, el cabal d'aire adquireix vapor d'aigua fins arribar a la saturació. Aquest factor afegit a que la temperatura de l'aire humit a la sortida augmenta, fan que l'entalpia en la sortida sempre sigui més gran.

Tanmateix, també s'aprecia que els valors de les entalpies sobretot a les primeres hores del matí i també a les últimes del vespre són més petits que les del migdia. Això és degut a una qüestió merament ambiental, donat que les temperatures en les hores de més Sol són més elevades. No obstant, tot i que les humitats relatives en canvi, baixin, la variació d'aquestes

és menor, i la seva influència en el canvi d'entalpia també ho és. Tots aquests comportaments es poden observar amb més claredat mitjançant al diagrama psicromètric de la Figura A.1. Vegis per exemple, que en temperatures de l'aire sec al voltant dels 10-15 °C, el fet de pujar o baixar la temperatura, fa variar molt més l'entalpia que el fet de que la humitat relativa passi del 75% al 70%.

El fet que les entalpies d'entrada siguin més elevades degut als factors ambientals provoca que les de la sortida també ho hagin de ser, per poder assumir la refrigeració de tot el cabal d'aigua enviat per les bombes. De no ser així, no s'estaria refrigerant l'aigua a la temperatura nominal ( $T_N$ ) del circuit.

#### 4.2. Comparació dels cabals obtinguts pels dos mètodes

Amb l'anàlisi del resultats per a les bombes i per a les torres ja fet, restarà només dur a terme la comparativa entre tots dos cabals per poder determinar si la modelització del circuit i les hipòtesis assumides són les correctes.

Aquesta comparació es mostra en la taula següent per a la que es tenen les columnes del cabal obtingut per mitjà del mètode de les entalpies, el cabal obtingut amb les bombes, i la diferència entre els dos.

Hora	Cabal		
	<i>Torres</i>	<i>Bombes</i>	<i>Diferència</i>
	m3/h	m3/h	m3/h
08/12/2017 7:00	84,3	86,5	-2,2
08/12/2017 7:10	94,7	86,5	8,2
08/12/2017 7:20	74,4	72,3	2,1
08/12/2017 7:30	71,3	72,5	-1,2
08/12/2017 7:40	54,1	48,4	5,8
08/12/2017 7:50	53,0	48,1	4,9
08/12/2017 8:00	96,4	86,4	10,0
08/12/2017 8:10	82,6	86,4	-3,8
08/12/2017 8:20	77,4	72,5	4,9
08/12/2017 8:30	77,2	72,4	4,9
08/12/2017 8:40	72,6	72,4	0,2



08/12/2017 8:50	53,7	48,3	5,4
08/12/2017 9:00	52,9	48,3	4,6
08/12/2017 9:10	89,9	86,3	3,6
08/12/2017 9:20	89,4	86,4	2,9
08/12/2017 9:30	77,2	72,4	4,8
08/12/2017 9:40	78,1	72,5	5,6
08/12/2017 9:50	56,3	48,2	8,1
08/12/2017 10:00	85,7	86,5	-0,7
08/12/2017 10:10	87,0	86,5	0,5
08/12/2017 10:20	76,7	72,3	4,3
08/12/2017 10:30	74,2	72,4	1,8
08/12/2017 10:40	51,7	48,0	3,7
08/12/2017 10:50	53,0	48,2	4,8
08/12/2017 11:00	82,0	86,4	-4,5
08/12/2017 11:10	73,1	72,3	0,8
08/12/2017 11:20	72,6	72,1	0,5
08/12/2017 11:30	72,9	72,3	0,6
08/12/2017 11:40	72,1	72,5	-0,4
08/12/2017 11:50	69,7	72,6	-3,0
08/12/2017 12:00	117,9	241,3	-123,4
08/12/2017 12:10	73,5	72,5	1,0
08/12/2017 12:20	71,3	72,4	-1,1
08/12/2017 12:30	53,9	48,2	5,7
08/12/2017 12:40	88,1	86,4	1,8
08/12/2017 12:50	91,8	86,4	5,3
08/12/2017 13:00	74,3	72,2	2,1
08/12/2017 13:10	67,5	72,4	-4,9
08/12/2017 13:20	44,5	48,3	-3,8

08/12/2017 13:30	83,5	86,5	-3,1
08/12/2017 13:40	155,9	259,4	-103,5
08/12/2017 13:50	75,7	72,5	3,2
08/12/2017 14:00	52,3	48,2	4,1
08/12/2017 14:10	90,6	86,4	4,1
08/12/2017 14:20	156,6	259,0	-102,4
08/12/2017 14:30	71,6	72,2	-0,7
08/12/2017 14:40	72,9	72,5	0,4
08/12/2017 14:50	51,1	48,3	2,8
08/12/2017 15:00	91,7	86,5	5,1
08/12/2017 15:10	189,2	259,6	-70,4
08/12/2017 15:20	74,5	72,4	2,1
08/12/2017 15:30	85,3	86,4	-1,1
08/12/2017 15:40	86,1	86,6	-0,5
08/12/2017 15:50	92,8	92,4	0,4
08/12/2017 16:00	79,6	72,4	7,2
08/12/2017 16:10	84,3	86,4	-2,1
08/12/2017 16:20	43,9	43,4	0,5
08/12/2017 16:30	72,1	72,2	-0,2
08/12/2017 16:40	132,0	172,6	-40,6
08/12/2017 16:50	88,8	85,7	3,1
08/12/2017 17:00	90,9	91,5	-0,6
08/12/2017 17:10	76,9	72,2	4,7
08/12/2017 17:20	88,5	86,4	2,1
08/12/2017 17:30	62,4	47,6	14,9
08/12/2017 17:40	75,4	72,3	3,1
08/12/2017 17:50	40,6	44,9	-4,3
08/12/2017 18:00	48,2	48,4	-0,2

08/12/2017 18:10	84,8	72,4	12,5
08/12/2017 18:20	97,6	89,0	8,6
08/12/2017 18:30	64,5	72,6	-8,1
08/12/2017 18:40	64,1	72,5	-8,3
08/12/2017 18:50	78,6	86,4	-7,8
08/12/2017 19:00	87,3	91,4	-4,1
08/12/2017 19:10	201,9	259,2	-57,4
08/12/2017 19:20	91,2	86,5	4,7
08/12/2017 19:30	52,5	48,2	4,3
08/12/2017 19:40	69,0	72,3	-3,3
08/12/2017 19:50	88,5	82,6	5,9
08/12/2017 20:00	65,9	72,3	-6,5
08/12/2017 20:10	88,4	86,4	2,0
08/12/2017 20:20	93,0	97,0	-4,0
08/12/2017 20:30	75,7	86,5	-10,7
08/12/2017 20:40	45,8	46,6	-0,8
08/12/2017 20:50	58,9	72,1	-13,3
08/12/2017 21:00	78,6	72,5	6,1

Taula 4.4. Taula comparativa entre els cabals obtinguts per un mètode i els obtinguts per l'altre

Destaquen d'aquests resultats comparatius un seguit de valors en la columna de la diferència que divergeixen molt de la resta. Aquests valors, que no són més de sis, comparteixen tots una mateixa característica. Aquesta és que el cabal obtingut per mitjà de les bombes en els seus casos és el de plena càrrega, és a dir, al voltant de 200 m<sup>3</sup>/h, mentre que el de les torres no mostra aquest ple funcionament. Això s'observa també en els gràfics de càlculs de cabals per cadascun dels dos mètodes (Figures 4.1 i 4.3). Si bé és cert que s'aprecia el salt de cabals baixos a cabals molt més alts, mai arriba al valor calculat per mitjà de les bombes.

Aquest desquadrament que apareix es deu a que les torres de refrigeració estan sent exigides per sobre de la seva capacitat màxima de treball, i en conseqüència, no poden refrigerar tota l'aigua que es voldria. En moltes ocasions, la capacitat màxima establerta pel fabricant es troba per sobre de les condicions reals a les que pot arribar a treballar la torre. El resultat, és

que en aquestes situacions de màxima càrrega de treball, les torres no podran assumir tot el cabal que impulsen les bombes.

Tanmateix, per a la resta de resultats, la comparativa és bastant coincident, ja que els resultats obtinguts a través de les dues modelitzacions no només són similars, sinó que segueixen el mateix patró. Això significa que en la majoria dels casos, es reflexen els salts del nivell de capacitat, com per exemple, el de nivell baix a mig.

Que el comportament dels resultats sigui coherent l'un amb l'altre implica que malgrat la dificultat que comporta, el balanç es pot considerar correcte a l'hora que les hipòtesis preses també.

Per acabar, s'ha considerat interessant fer un gràfic comparatiu entre les temperatures d'entrada i sortida del flux d'aigua a la torre EWK i del cabal mesurat a partir de les bombes per veure si mantenien alguna relació. Aquesta comparació es pot veure a la Figura 4.5.

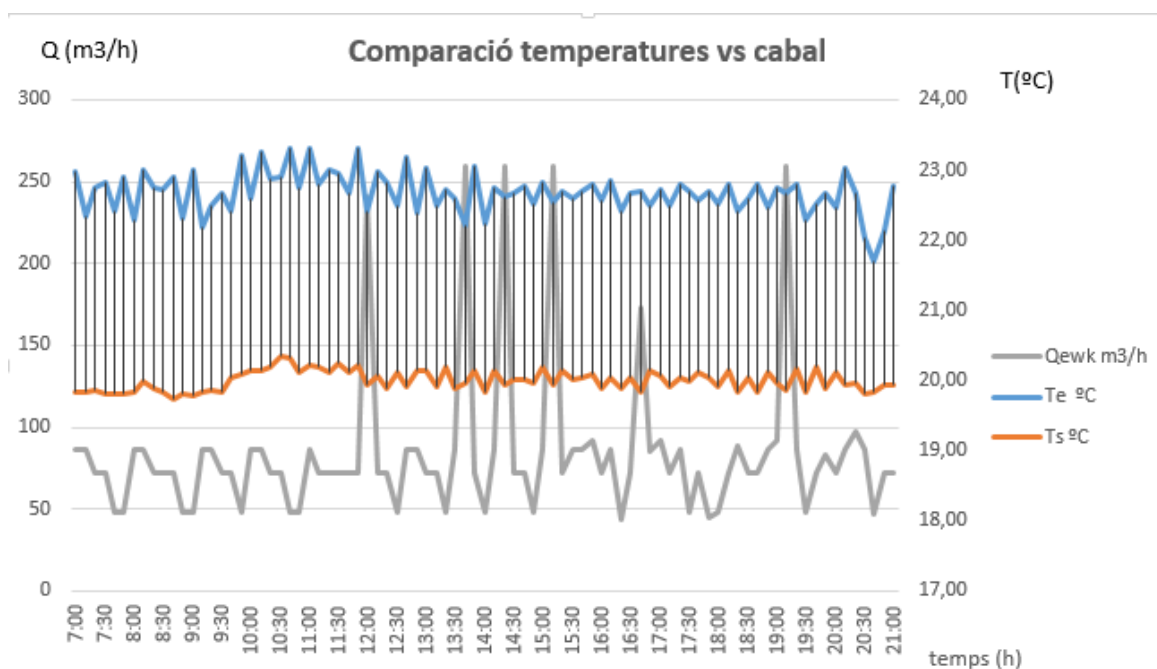


Figura 4.5. Gràfic comparatiu de les temperatures d'entrada i sortida de l'aigua a les torres EWK amb el cabal obtingut per les bombes.

El gràfic mostra que més enllà de valorar els valors del cabal i de les temperatures per separat, ambdós paràmetres no són correlatius. És a dir, no segueixen el patró de l'altre, i per tant es pot afirmar, que el paràmetre de les torres que més relació tindrà amb els cabals que circulen a través del circuit és l'entalpia de l'aire.

#### 4.3. Expectatives de futur

La realització d'aquest projecte posa de manifest la possibilitat d'obtenir el punt de funcionament d'una bomba (alçada i cabal) o els paràmetres d'una torre de refrigeració partint de bases de dades força limitades. Això permet entreveure que per a futurs anàlisis no té perquè ser necessari tenir el conjunt de dades en la seva totalitat, sinó que es pot realitzar una primera aproximació del càlcul amb poques d'elles. Aquest primer anàlisi serà el que permeti tenir una primera visió global del comportament del circuit i treure'n les primeres conclusions al respecte. Quedarà a les mans de l'enginyer la decisió d'aprofundir més posteriorment o no.

L'altre perspectiva de futur que té aquest projecte té a veure amb la pròpia instal·lació de la fàbrica. A partir de les metodologies utilitzades i de les conclusions extretes, es podria realitzar un anàlisi molt més precís i extensiu del circuit. Una part d'ell podria anar enfocat a millorar la capacitat de les torres de refrigeració i optimitzar encara més el rendiment dels seus ventiladors, mentre que l'altra aniria cap a les bombes.

Aquesta última millora seria la més significativa, ja que com s'ha vist, es podria optimitzar el treball de les bombes establint els seus punts de treball als *best efficiency points*. La metodologia seguida per als cabals de les bombes, permet en bona part trobar aquests punts de màxima eficiència. Si a més, es té en compte que es poden reubicar els punts de monitorització de les dades de les bombes per a que no estiguin afectades per les pèrdues de càrrega esmentades, l'anàlisi resultaria molt més senzill i fiable.

## 5. Conclusions

### • Conclusions

S'ha arribat a les següents conclusions en referència als objectius plantejats en aquest treball.

- Mitjançant una sèrie d'hipòtesis inicials i realitzant balanços a partir d'unes dades extretes de situacions reals, és factible trobar els cabals que circulen per un circuit hidràulic amb mètodes diferents. El fet de que els dos càlculs siguin, si més no, semblants, permet afirmar que l'aproximació ha estat la correcta i que els resultats s'assimilen bastant a la realitat.
- Malgrat no es disposi de totes les dades que es voldria, és viable trobar el punt de funcionament d'una bomba coneguda en una instal·lació hidràulica.
- S'ha pogut constatar que les temperatures de sortida de l'aigua mesos després de la optimització introduïda, es mantenen estables al voltant del valor de la temperatura nominal ( $T_N$ ) de l'aigua del CSN.
- No sempre el cabal que impulsen les bombes és el mateix que l'assumit per les torres, ja que existeixen limitacions de funcionament que impedeixen que les torres de refrigeració puguin refredar tot el cabal que es voldria per a un instant determinat.
- En les instal·lacions en que dues o varies bombes hidràuliques treballen en paral·lel, es reparteix la càrrega de treball entre les diferents bombes per tal de no sobreexplotar-ne una.

## 6. Estudi d'impacte ambiental

Tot el treball d'aquest projecte ha estat realitzat per mitjà d'un ordinador, des del qual s'ha buscat informació, s'ha mantingut contacte amb el tutor, s'han realitzat tots els anàlisis de dades amb la finalitat d'extreure'n resultats, s'han analitzat els resultats obtinguts i finalment s'ha redactat la memòria. Degut a aquest fet, l'impacte mediambiental generat en la creació d'aquest projecte és molt baix. Tot i així, alguns aspectes s'han de tenir en compte:

- Consum energètic d'electricitat degut a la il·luminació, la climatització i sobretot a l'ordinador, ja que pel fet d'haver estat fent servir grans bases de dades, en moltes ocasions s'han tardat períodes llargs de temps a executar els càlculs durant els quals l'ordinador estava engegat i treballant a ple rendiment.
- Consum de paper, eines d'escriptura i tinta d'impressió entre d'altres estris d'oficina usats per a fer càlculs, esbossos, apunts i impressions d'aspectes relacionats amb el projecte.

De totes maneres, aquest projecte ha estat dut a terme per a intentar estudiar el comportament de les torres de refrigeració en una instal·lació hidràulica real. Més concretament, l'estudi ha estat fet mesos després de la introducció del controlador PID al sistema. La millora introduïda en les torres permet un menor consum energètic en ventiladors, ja que el fet de no engegar-se i apagar-se contínuament permet que siguin més òptims.

## 7.Pressupost

Per al que es refereix al pressupost d'aquest projecte, en la Taula 7.1 s'especifiquen les despeses associades i l'import final.

Concepte	Quantitat	Preu	Import
Hores d'enginyer Becari	200 hores	10 €/hora	2000 €
Hores d'enginyer senior	30 hores	50 €/hora	1500 €
Material d'oficina	-	-	100 €
Ordinador	-	-	1000 €
Impressora	-	-	120 €
Internet	-	-	100 €
Consum d'electricitat	-	-	150 €
Llicència Microsoft Office	-	-	100 €
<b>Base Imposable</b>			<b>5070 €</b>
<b>IVA (21%)</b>			<b>1064,7 €</b>
<b>TOTAL</b>			<b>6134,70 €</b>

Taula 7.1. Pressupost total del projecte



## Agraïments

Per tancar aquest projecte volia agraïr molt especialment a l'empresa de laminats de plàstics per totes les facilitats que han posat per a que es pogués realitzar amb èxit aquest estudi. No només compartir les dades dels seus circuits amb nosaltres, sinó també mostrar les instal·lacions, respondre dubtes qualsevol moment de l'any sense demores i facilitar la documentació necessària per conèixer tots els components de la planta industrial.

Volia agraïr també al professor Esteve Jou per la paciència i dedicació, pels consells i per ajudar-me en tot moment a encaminar el treball i a obtenir les dades necessàries. Però sobretot per les facilitats que m'ha donat per contactar amb l'empresa, tant per fer-ho jo mateix, com a través seu.

## Referències i Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] INE (Instituto Nacional de Estadística). “*Distribución porcentual de los activos por sector económico y provincia 2017*”. Gener 2018. <http://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=3994>
- [2] EPSEM, UPC. (2018). “*Torres de refredament*”. Desembre 2017. [http://epsem.upc.edu/intercanviadorsdecalor/torres\\_refredament.html](http://epsem.upc.edu/intercanviadorsdecalor/torres_refredament.html);
- [3] Sergio Mier Santiso (Enero 2013). “*Análisis termodinámico y cálculo básico de la caldera y la torre de refrigeración de la central térmica de la Robla (PFC)*”. UC3M.
- [4] C. Salas, Universidad de Los Andes. “*Las Torres de Enfriamiento*”. Desembre 2017. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/torres1.pdf>
- [5] Departament de Mecànica de Fluids ETSEIB. “*Tema2: Les bombes hidràuliques*”. Desembre 2017
- [6] Amparo López Jiménez (2013). “*El funcionamiento de las bombas en las estaciones de bombeo*”. UPV
- [7] Dpt Mecánica de Fluidos, Universidad de Oviedo. “*Pérdidas de Carga*”. Gener 2018 <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/Manuales/Perdidasdecarga.pdf>
- [8] Xavier Ramis Juan (2017). “*Tema 7 Termodinámica. Mescles no reatives de gasos ideals*”
- [9] Calor específic de l'aigua: definicions. Gener 2018. <http://meteopirineu.com/pag/definicions.php>
- [10] Datos tabulados del calor específico del agua. Gener 2018. [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/caloresph2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/caloresph2o.pdf)

### Bibliografia consultada

- White, Frank M. “*Mecánica de fluidos*”. McGraw-Hill, cop. 1983.
- Dpto Maq y Mot. Térmicos – UPDonostia. “*Comportamiento de una torre de refrigeración*”. Desembre 2017. <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/Torre.htm>
- Amparo López Jiménez (2013). “*Las Leyes de Semejanza*”. UPV.
- Amparo Moreno Valencia (2017). “*Grupos de Bombeo II*”. Universidad de Ciudad Real.

- Çengel, Yunus A., John M. Cimbala. 2006. *“Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”*. McGraw-Hill.
- Baltimore Aircoil Company: *El enfriamiento evaporativo*.  
<https://www.baltimoreaircoil.eu/es/centro-de-conocimiento/enfriamiento-evaporativo>
- EWK: *características generales torres de refrigeración*.  
<https://www.ewk.eu/index.php/producto/es/ewk>
- Johnson Pump. <http://www.spxflow.com/en/johnson-pump/>
- I. Martin, R. Salcedo, R. Font. 2011. *“Mecánica de Fluidos: Impulsión de los fluidos”*. Universitat d’Alacant.

## Annex

## A. Diagrama Psicromètric

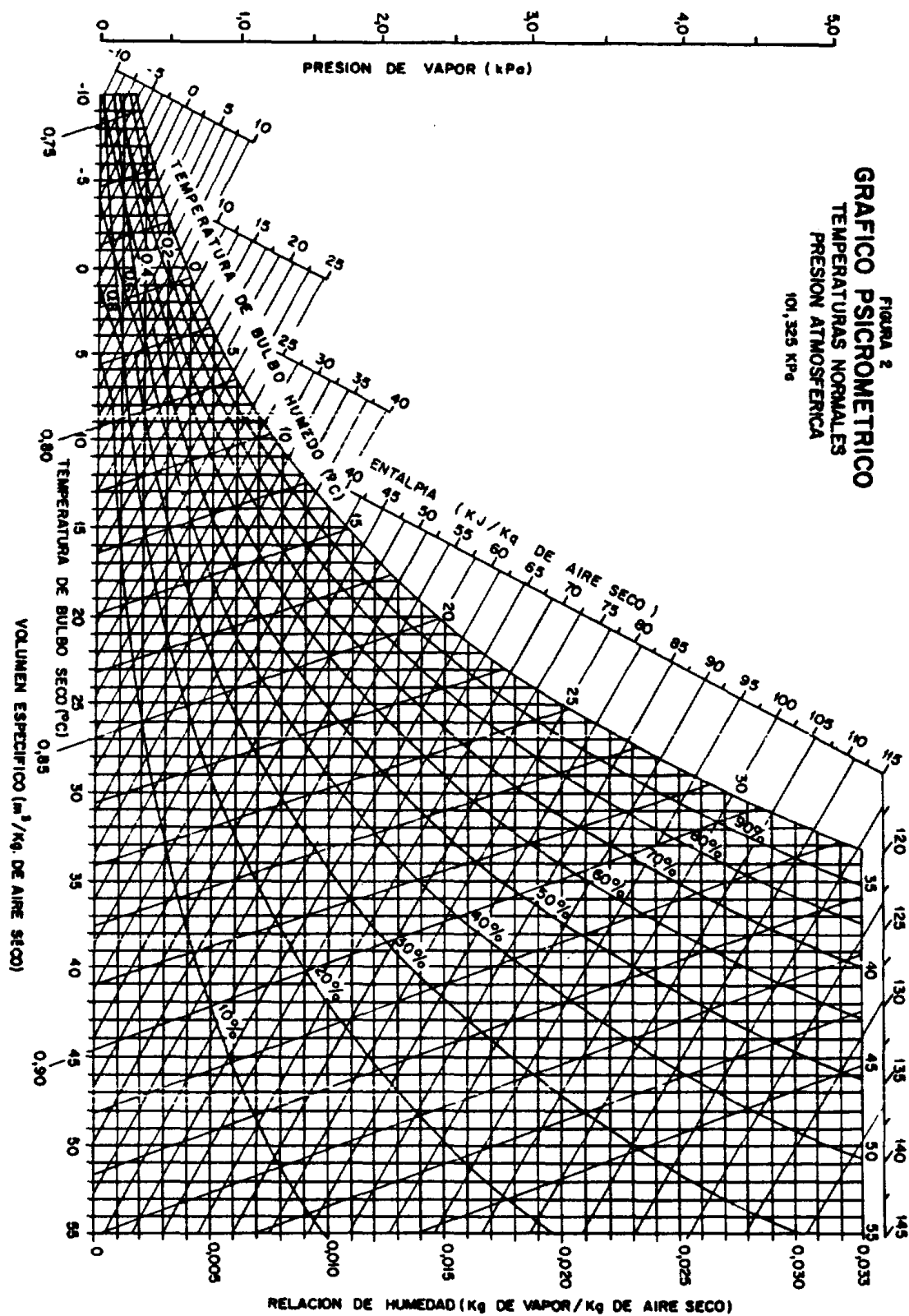


Figura A.1. Diagrama Psicromètric.

## B. Taules de càlculs i resultats

## B.1. Càlcul de les entalpies de l'aire

## B.1.1. Càlcul de l'entalpia de l'aire a l'entrada de la torre de refrigeració EWK-900/09

Hora	Pressió	Temperatura aire sec a l'entrada	Humitat relativa	Temperatura aire humit	Humitat absoluta		Entalpia de l'aire sec a l'entrada
<i>h</i>	<i>P</i>	<i>Tas1</i>	<i>HR1</i>	<i>Tah1</i>	<i>Habs</i>		<i>H1</i>
	<i>hPa</i>	°C	%	°C	<i>g/m3</i>	<i>kg vap aigua/kg aire sec</i>	<i>kJ/kg aire sec</i>
7:00	1022,9	5,2	71	3,2	4,9	0,004	14,7
7:10	1022,9	5,1	72	3,2	4,9	0,004	14,7
7:20	1022,9	4,9	72	3,0	4,9	0,004	14,3
7:30	1022,9	4,7	73	2,9	4,9	0,004	14,1
7:40	1022,9	3,9	74	2,2	4,7	0,004	13,0
7:50	1022,9	3,4	76	1,9	4,7	0,004	12,4
8:00	1022,9	2,9	78	1,5	4,6	0,004	11,8
8:10	1022,6	2,7	79	1,4	4,6	0,004	11,6
8:20	1022,9	2,4	80	1,2	4,6	0,004	11,2
8:30	1023,2	2,3	81	1,1	4,6	0,004	11,2
8:40	1023,2	2,3	82	1,2	4,7	0,004	11,3
8:50	1023,2	2,7	83	1,7	4,9	0,004	12,1
9:00	1023,2	3,3	82	2,2	5,0	0,004	12,9
9:10	1022,6	4,3	79	2,9	5,1	0,004	14,2
9:20	1023,2	4,9	76	3,3	5,1	0,004	14,9
9:30	1023,2	5,1	75	3,4	5,1	0,004	15,1
9:40	1022,9	5,1	76	3,5	5,1	0,004	15,1
9:50	1023,2	5,2	75	3,5	5,2	0,004	15,2
10:00	1022,9	5,4	76	3,8	5,3	0,004	15,7

10:10	1022.9	5,5	76	3,9	5,4	0,004	<b>15,9</b>
10:20	1022.9	5,8	75	4,1	5,4	0,004	<b>16,2</b>
10:30	1022.9	6,4	73	4,5	5,5	0,004	<b>17,0</b>
10:40	1022.9	6,8	71	4,7	5,4	0,004	<b>17,4</b>
10:50	1022.9	7,3	70	5,1	5,6	0,004	<b>18,1</b>
11:00	1022.9	7,6	69	5,3	5,6	0,004	<b>18,4</b>
11:10	1022.6	7,8	68	5,4	5,6	0,004	<b>18,6</b>
11:20	1022.6	7,9	68	5,5	5,6	0,004	<b>18,8</b>
11:30	1022.6	8,1	67	5,6	5,6	0,004	<b>19,0</b>
11:40	1022.6	8,3	68	5,9	5,8	0,004	<b>19,5</b>
11:50	1022.6	8,4	67	5,9	5,7	0,004	<b>19,5</b>
12:00	1022.2	8,7	67	6,1	5,8	0,004	<b>20,0</b>
12:10	1022.2	9	66	6,3	5,8	0,004	<b>20,4</b>
12:20	1022.2	9,2	66	6,5	5,9	0,005	<b>20,7</b>
12:30	1022.2	9,3	66	6,6	6,0	0,005	<b>20,9</b>
12:40	1021.9	9,4	66	6,7	5,9	0,005	<b>21,0</b>
12:50	1021.9	9,6	65	6,8	6,0	0,005	<b>21,2</b>
13:00	1021.9	9,7	65	6,9	6,0	0,005	<b>21,4</b>
13:10	1021.9	9,9	65	7,0	6,1	0,005	<b>22,7</b>
13:20	1021.9	10,3	62	7,1	6,0	0,005	<b>22,9</b>
13:30	1021.9	10,6	60	7,2	5,9	0,005	<b>23,0</b>
13:40	1021.6	10,7	58	7,0	5,7	0,005	<b>22,8</b>
13:50	1021.6	10,8	58	7,1	5,8	0,005	<b>22,9</b>
14:00	1021.6	11	59	7,4	5,9	0,005	<b>23,5</b>
14:10	1021.2	11,2	60	7,7	6,1	0,005	<b>24,1</b>
14:20	1021.2	11,4	59	7,8	6,1	0,005	<b>24,2</b>

14:30	1021.2	11,8	58	8,0	6,1	0,005	<b>24,7</b>
14:40	1021.2	12,2	57	8,2	6,2	0,005	<b>25,2</b>
14:50	1021.2	12,4	56	8,3	6,1	0,005	<b>25,4</b>
15:00	1021.2	12,6	55	8,4	6,1	0,005	<b>25,5</b>
15:10	1021.2	12,9	55	8,6	6,2	0,005	<b>26,0</b>
15:20	1021.6	13,2	55	8,9	6,3	0,005	<b>26,6</b>
15:30	1021.6	13,8	54	9,3	6,5	0,005	<b>27,5</b>
15:40	1021.2	13,9	55	9,5	6,6	0,006	<b>27,9</b>
15:50	1021.6	14,3	56	9,9	6,9	0,006	<b>28,9</b>
16:00	1021.6	14,7	54	10,0	6,8	0,006	<b>29,1</b>
16:10	1021.6	14,7	53	9,9	6,7	0,006	<b>28,9</b>
16:20	1021.6	14,3	58	10,2	7,1	0,006	<b>29,4</b>
16:30	1021.6	13,8	62	10,2	7,4	0,006	<b>29,5</b>
16:40	1021.6	13,4	65	10,2	7,6	0,006	<b>29,4</b>
16:50	1021.6	13	68	10,2	7,7	0,006	<b>29,3</b>
17:00	1021.9	12,6	71	10,2	7,9	0,007	<b>29,2</b>
17:10	1021.9	12,1	70	9,6	7,5	0,006	<b>28,0</b>
17:20	1021.9	11,5	66	8,6	6,8	0,006	<b>25,9</b>
17:30	1021.9	11,2	65	8,2	6,6	0,006	<b>25,1</b>
17:40	1021.9	10,8	65	7,9	6,4	0,005	<b>24,4</b>
17:50	1021.9	10,4	66	7,6	6,4	0,005	<b>23,9</b>
18:00	1021.9	10,1	68	7,5	6,5	0,005	<b>23,7</b>
18:10	1022.2	9,7	69	7,2	6,4	0,005	<b>22,1</b>
18:20	1022.2	9,5	70	7,2	6,4	0,005	<b>21,9</b>
18:30	1022.2	9,2	71	7,0	6,4	0,005	<b>21,6</b>
18:40	1022.2	9,1	71	6,9	6,3	0,005	<b>21,4</b>

18:50	1022.2	9,2	72	7,1	6,5	0,005	21,7
19:00	1022.2	9,2	72	7,1	6,5	0,005	21,7
19:10	1022.2	9,3	72	7,2	6,5	0,005	21,9
19:20	1021.9	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
19:30	1021.9	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
19:40	1021.9	9,5	71	7,2	6,5	0,005	22,1
19:50	1021.9	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
20:00	1022.2	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
20:10	1021.9	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
20:20	1022.2	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
20:30	1022.2	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
20:40	1022.2	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
20:50	1021.9	9,4	72	7,2	6,5	0,005	22,1
21:00	1021.9	9,6	72	7,4	6,6	0,005	22,5

Taula B.1.1. Càlcul de l'entalpia de l'aire sec a l'entrada.



## B.1.2.. Càlcul de l'entalpia de l'aire a la sortida de la torre de refrigeració EWK-900/09

Hora	Pressió	Temperatura aire sec a la sortida	Humitat relativa	Humitat absoluta		Entalpia de l'aire sec a la sortida
h	P	Tas2	HR2	Habs		H2
	hPa	°C	%	g/m3	kg vap aigua/kg aire sec	kJ/kg aire sec
7:00	1022,9	7,7	100	8,1	0,006	23,5
7:10	1022,9	7,2	100	7,9	0,006	22,5
7:20	1022,9	6,7	100	7,6	0,006	21,5
7:30	1022,9	6,6	100	7,6	0,006	21,3
7:40	1022,9	4,7	100	6,7	0,005	17,6
7:50	1022,9	4,8	100	6,7	0,005	17,8
8:00	1022,9	5,8	100	7,2	0,006	19,7
8:10	1022,6	5,9	100	7,2	0,006	19,9
8:20	1022,9	5,2	100	6,9	0,005	18,6
8:30	1023,2	5,2	100	6,9	0,005	18,6
8:40	1023,2	5,4	100	7,0	0,005	19,0
8:50	1023,2	4,1	100	6,4	0,005	16,5
9:00	1023,2	5,2	100	6,9	0,005	18,6
9:10	1022,6	6,6	100	7,6	0,006	21,3
9:20	1023,2	7,3	100	7,9	0,006	22,7
9:30	1023,2	7,1	100	7,8	0,006	22,3
9:40	1022,9	6,6	100	7,6	0,006	21,3
9:50	1023,2	6,5	100	7,5	0,006	21,1
10:00	1022,9	7,3	100	7,9	0,006	22,7
10:10	1022,9	8,4	100	8,5	0,007	24,9
10:20	1022,9	7,5	100	8,0	0,006	23,1
10:30	1022,9	7,6	100	8,1	0,006	23,3

10:40	1022.9	7,2	100	7,9	0,006	22,5
10:50	1022.9	7,3	100	7,9	0,006	22,7
11:00	1022.9	9,3	100	9,0	0,007	26,8
11:10	1022.6	8,4	100	8,5	0,007	24,9
11:20	1022.6	8,8	100	8,7	0,007	25,8
11:30	1022.6	8,7	100	8,7	0,007	25,5
11:40	1022.6	8,7	100	8,7	0,007	25,5
11:50	1022.6	9,2	100	9,0	0,007	26,6
12:00	1022.2	10,6	100	9,8	0,008	29,7
12:10	1022.2	9,6	100	9,2	0,007	27,5
12:20	1022.2	9,7	100	9,3	0,007	27,7
12:30	1022.2	8,5	100	8,6	0,007	25,1
12:40	1021.9	10,3	100	9,6	0,008	30,5
12:50	1021.9	9,9	100	9,4	0,007	28,1
13:00	1021.9	10,1	100	9,5	0,007	28,5
13:10	1021.9	10,1	100	9,5	0,007	28,5
13:20	1021.9	9,2	100	9,0	0,007	26,6
13:30	1021.9	10,3	100	9,6	0,008	30,5
13:40	1021.6	11,9	100	10,6	0,009	34,3
13:50	1021.6	10,2	100	9,5	0,008	30,3
14:00	1021.6	9,7	100	9,3	0,007	27,7
14:10	1021.2	10,9	100	10,0	0,008	31,9
14:20	1021.2	13,5	100	11,7	0,010	38,3
14:30	1021.2	10,5	100	9,7	0,008	31,0
14:40	1021.2	10,9	100	10,0	0,008	31,9
14:50	1021.2	9,9	100	9,4	0,008	29,7

15:00	1021.2	11,6	100	10,4	0,009	33,5
15:10	1021.2	15,1	100	12,9	0,011	42,4
15:20	1021.6	11,3	100	10,2	0,009	32,9
15:30	1021.6	12,1	100	10,8	0,009	34,8
15:40	1021.2	12,4	100	11,0	0,009	35,5
15:50	1021.6	13,1	100	11,4	0,010	37,3
16:00	1021.6	12,7	100	11,2	0,009	36,3
16:10	1021.6	12,9	100	11,3	0,009	36,8
16:20	1021.6	11,4	100	10,3	0,009	33,1
16:30	1021.6	12,5	100	11,0	0,009	35,8
16:40	1021.6	14,9	100	12,8	0,011	41,9
16:50	1021.6	12,7	100	11,2	0,009	36,3
17:00	1021.9	13,1	100	11,4	0,010	37,3
17:10	1021.9	12,0	100	10,7	0,009	34,5
17:20	1021.9	11,8	100	10,6	0,009	34,1
17:30	1021.9	10,4	100	9,7	0,008	30,8
17:40	1021.9	10,3	100	9,6	0,008	30,5
17:50	1021.9	9,6	100	9,2	0,007	27,5
18:00	1021.9	9,8	100	9,3	0,007	27,9
18:10	1022.2	9,9	100	9,4	0,008	29,6
18:20	1022.2	10,2	100	9,5	0,008	30,3
18:30	1022.2	9,4	100	9,1	0,007	27,0
18:40	1022.2	9,7	100	9,3	0,007	27,7
18:50	1022.2	9,8	100	9,3	0,007	27,9
19:00	1022.2	10,0	100	9,4	0,008	29,8
19:10	1022.2	15,3	100	13,1	0,010	40,9

19:20	1021.9	10,1	100	9,5	0,008	30,1
19:30	1021.9	9,1	100	8,9	0,007	26,4
19:40	1021.9	9,6	100	9,2	0,007	27,5
19:50	1021.9	10,2	100	9,5	0,008	30,3
20:00	1022.2	9,5	100	9,1	0,007	27,2
20:10	1021.9	10,6	100	9,8	0,008	31,2
20:20	1022.2	10,3	100	9,6	0,008	30,5
20:30	1022.2	9,7	100	9,3	0,007	27,7
20:40	1022.2	8,4	100	8,5	0,007	24,9
20:50	1021.9	9,1	100	8,9	0,007	26,4
21:00	1021.9	10,0	100	9,4	0,008	29,8

Taula B.1.2. Taula del càlcul de les entalpies de l'aire en la sortida.

*B.1.3. Mesures i càlcul del cabal de l'aire sec*

A continuació es presenta la taula de mesures rutinàries del cabal de l'aire sec en les torres de refrigeració, i del càlcul de la seva mitja.

Mesura rutinària		
<i>Dia</i>	<i>Flux màssic</i>	<i>Cabal</i>
	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	<i>kg/s</i>
<b>22.12.2014</b>	21,6	25,8
<b>16.01.2015</b>	32,7	38,6
<b>08.10.2015</b>	27,7	33,1
<b>4.11.2015</b>	31,1	37,1
<b>16.12.2015</b>	29,0	34,6
<b>13.1.2016</b>	31,0	37,1
<b>3.12.2016</b>	31,7	37,9
<b>Mitja</b>	<b>29,3</b>	<b>34,9</b>

Taula B.1.3. Taula del càlcul de la mitja de les mesures rutinàries.

## B.2. Càlcul del cabal que circula a través de cada bomba

Data i Hora	Cabal Bomba 1	Cabal Bomba 2	Cabal Bomba 3	Cabal Total	Cabal que circula per una torre EWK-900/09
	$Q_{b1}$	$Q_{b2}$	$Q_{b3}$	$Q_{tot}$	$Q_{ewk}$
	$m^3/h$	$m^3/h$	$m^3/h$	$m^3/h$	$m^3/h$
08/12/2017 7:00	172,93	0,00	0,00	172,93	86,46
08/12/2017 7:10	172,97	0,00	0,00	172,97	86,48
08/12/2017 7:20	48,35	48,27	48,05	144,67	72,34
08/12/2017 7:30	48,30	48,40	48,38	145,08	72,54
08/12/2017 7:40	48,41	48,33	0,00	96,74	48,37
08/12/2017 7:50	48,06	48,18	0,00	96,24	48,12
08/12/2017 8:00	172,73	0,00	0,00	172,73	86,37
08/12/2017 8:10	172,79	0,00	0,00	172,79	86,39
08/12/2017 8:20	48,20	48,43	48,41	145,04	72,52
08/12/2017 8:30	48,29	48,38	48,04	144,71	72,35
08/12/2017 8:40	48,00	48,50	48,34	144,84	72,42
08/12/2017 8:50	48,15	48,42	0,00	96,57	48,29
08/12/2017 9:00	48,37	48,18	0,00	96,54	48,27
08/12/2017 9:10	172,69	0,00	0,00	172,69	86,35
08/12/2017 9:20	172,82	0,00	0,00	172,82	86,41
08/12/2017 9:30	48,30	48,33	48,19	144,82	72,41
08/12/2017 9:40	48,38	48,40	48,15	144,93	72,47
08/12/2017 9:50	48,03	48,40	0,00	96,43	48,21
08/12/2017 10:00	172,95	0,00	0,00	172,95	86,47
08/12/2017 10:10	172,96	0,00	0,00	172,96	86,48
08/12/2017 10:20	48,22	48,22	48,26	144,70	72,35
08/12/2017 10:30	48,23	48,30	48,19	144,73	72,36

08/12/2017 10:40	48,09	47,99	0,00	96,08	<b>48,04</b>
08/12/2017 10:50	48,13	48,28	0,00	96,40	<b>48,20</b>
08/12/2017 11:00	172,85	0,00	0,00	172,85	<b>86,43</b>
08/12/2017 11:10	48,18	48,18	48,20	144,56	<b>72,28</b>
08/12/2017 11:20	48,13	48,09	48,04	144,26	<b>72,13</b>
08/12/2017 11:30	48,15	48,33	48,09	144,58	<b>72,29</b>
08/12/2017 11:40	48,38	48,32	48,28	144,98	<b>72,49</b>
08/12/2017 11:50	48,40	48,41	48,44	145,25	<b>72,63</b>
08/12/2017 12:00	173,13	172,79	136,72	482,64	<b>241,32</b>
08/12/2017 12:10	48,40	48,35	48,29	145,04	<b>72,52</b>
08/12/2017 12:20	48,28	48,36	48,15	144,80	<b>72,40</b>
08/12/2017 12:30	48,21	48,23	0,00	96,45	<b>48,22</b>
08/12/2017 12:40	172,78	0,00	0,00	172,78	<b>86,39</b>
08/12/2017 12:50	172,82	0,00	0,00	172,82	<b>86,41</b>
08/12/2017 13:00	48,13	48,01	48,17	144,32	<b>72,16</b>
08/12/2017 13:10	48,22	48,22	48,31	144,75	<b>72,37</b>
08/12/2017 13:20	48,43	48,23	0,00	96,66	<b>48,33</b>
08/12/2017 13:30	173,02	0,00	0,00	173,02	<b>86,51</b>
08/12/2017 13:40	173,20	172,78	172,80	518,77	<b>259,39</b>
08/12/2017 13:50	48,11	48,52	48,34	144,98	<b>72,49</b>
08/12/2017 14:00	48,22	48,09	0,00	96,31	<b>48,15</b>
08/12/2017 14:10	172,89	0,00	0,00	172,89	<b>86,45</b>
08/12/2017 14:20	172,57	172,66	172,78	518,01	<b>259,00</b>
08/12/2017 14:30	48,20	48,18	48,10	144,48	<b>72,24</b>
08/12/2017 14:40	48,34	48,40	48,17	144,91	<b>72,45</b>
08/12/2017 14:50	48,19	48,40	0,00	96,59	<b>48,30</b>

08/12/2017 15:00	173,07	0,00	0,00	173,07	<b>86,53</b>
08/12/2017 15:10	173,23	172,89	173,12	519,24	<b>259,62</b>
08/12/2017 15:20	48,47	48,14	48,20	144,80	<b>72,40</b>
08/12/2017 15:30	0,00	172,77	0,00	172,77	<b>86,38</b>
08/12/2017 15:40	0,00	173,19	0,00	173,19	<b>86,59</b>
08/12/2017 15:50	0,00	92,41	92,33	184,74	<b>92,37</b>
08/12/2017 16:00	48,06	48,49	48,24	144,79	<b>72,39</b>
08/12/2017 16:10	0,00	172,85	0,00	172,85	<b>86,42</b>
08/12/2017 16:20	0,00	86,82	0,00	86,82	<b>43,41</b>
08/12/2017 16:30	48,39	48,02	48,04	144,45	<b>72,22</b>
08/12/2017 16:40	0,00	172,60	172,63	345,23	<b>172,61</b>
08/12/2017 16:50	0,00	171,39	0,00	171,39	<b>85,70</b>
08/12/2017 17:00	0,00	91,60	91,44	183,05	<b>91,52</b>
08/12/2017 17:10	48,12	48,12	48,18	144,42	<b>72,21</b>
08/12/2017 17:20	0,00	172,77	0,00	172,77	<b>86,39</b>
08/12/2017 17:30	0,00	95,18	0,00	95,18	<b>47,59</b>
08/12/2017 17:40	48,26	48,12	48,22	144,60	<b>72,30</b>
08/12/2017 17:50	0,00	89,87	0,00	89,87	<b>44,93</b>
08/12/2017 18:00	0,00	48,43	48,35	96,78	<b>48,39</b>
08/12/2017 18:10	48,39	48,04	48,35	144,78	<b>72,39</b>
08/12/2017 18:20	0,00	89,04	88,87	177,91	<b>88,95</b>
08/12/2017 18:30	48,48	48,45	48,29	145,21	<b>72,61</b>
08/12/2017 18:40	48,40	48,39	48,15	144,94	<b>72,47</b>
08/12/2017 18:50	0,00	172,77	0,00	172,77	<b>86,39</b>
08/12/2017 19:00	0,00	91,38	91,52	182,90	<b>91,45</b>
08/12/2017 19:10	172,71	172,74	173,02	518,47	<b>259,23</b>

08/12/2017 19:20	0,00	172,93	0,00	172,93	<b>86,47</b>
08/12/2017 19:30	0,00	48,20	48,17	96,37	<b>48,18</b>
08/12/2017 19:40	48,15	48,20	48,16	144,51	<b>72,25</b>
08/12/2017 19:50	0,00	82,49	82,72	165,21	<b>82,60</b>
08/12/2017 20:00	48,14	48,31	48,20	144,65	<b>72,32</b>
08/12/2017 20:10	0,00	172,80	0,00	172,80	<b>86,40</b>
08/12/2017 20:20	0,00	97,07	96,92	193,99	<b>97,00</b>
08/12/2017 20:30	0,00	172,96	0,00	172,96	<b>86,48</b>
08/12/2017 20:40	0,00	93,21	0,00	93,21	<b>46,60</b>
08/12/2017 20:50	48,15	48,14	47,96	144,25	<b>72,13</b>
08/12/2017 21:00	48,37	48,29	48,38	145,04	<b>72,52</b>

Taula B.2.1. Taula del càlcul del cabal que circula a través de cada bomba.

## B.3. Càlcul del cabal d'aigua que circula a través d'una torre de refrigeració EWK-900/09

Hora	AIRE			AIGUA			
	Entalpia			Flux calor	Temperatura		
	Entrada	Sortida	Variació	Calor	Entrada	Sortida	Cabal
	$h1$	$h2$	$\Delta H$	$q$	$T_e$	$T_s$	$Q_{ewk}$
	$kJ/kg\ aire$	$kJ/kg\ aire$	$kJ/kg\ aire$	$kJ/h$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$m3/h$
7:00	14,7	23,5	8,8	1107820,8	22,97	19,83	84,3
7:10	14,7	22,5	7,8	988222,8	22,33	19,84	94,7
7:20	14,3	21,5	7,1	898685,9	22,74	19,85	74,4
7:30	14,1	21,3	7,1	898673,5	22,82	19,80	71,3
7:40	13,0	17,6	4,7	587149,3	22,41	19,82	54,1
7:50	12,4	17,8	5,4	682064,6	22,90	19,82	53,0
8:00	11,8	19,7	7,9	993984,3	22,30	19,83	96,4
8:10	11,6	19,9	8,3	1044490,9	23,01	19,98	82,6



8:20	11,2	18,6	7,3	922578,6	22,74	19,89	<b>77,4</b>
8:30	11,2	18,6	7,4	929009,7	22,71	19,83	<b>77,2</b>
8:40	11,3	19,0	7,6	963079,1	22,90	19,72	<b>72,6</b>
8:50	12,1	16,5	4,4	560127,9	22,31	19,81	<b>53,7</b>
9:00	12,9	18,6	5,6	708700,3	23,00	19,79	<b>52,9</b>
9:10	14,2	21,3	7,0	885769,2	22,19	19,84	<b>89,9</b>
9:20	14,9	22,7	7,8	983481,0	22,50	19,87	<b>89,4</b>
9:30	15,1	22,3	7,2	907905,4	22,66	19,84	<b>77,2</b>
9:40	15,1	21,3	6,2	782766,2	22,43	20,03	<b>78,1</b>
9:50	15,2	21,1	5,8	736547,2	23,21	20,08	<b>56,3</b>
10:00	15,7	22,7	7,0	877661,4	22,59	20,14	<b>85,7</b>
10:10	15,9	24,9	9,0	1136596,6	23,26	20,14	<b>87,0</b>
10:20	16,2	23,1	6,8	860400,8	22,88	20,20	<b>76,7</b>
10:30	17,0	23,3	6,3	793136,7	22,90	20,34	<b>74,2</b>
10:40	17,4	22,5	5,1	642703,9	23,30	20,33	<b>51,7</b>
10:50	18,1	22,7	4,6	579647,9	22,73	20,12	<b>53,0</b>
11:00	18,4	26,8	8,4	1056279,4	23,30	20,22	<b>82,0</b>
11:10	18,6	24,9	6,3	793540,9	22,80	20,20	<b>73,1</b>
11:20	18,8	25,8	7,0	878143,4	23,00	20,11	<b>72,6</b>
11:30	19,0	25,5	6,6	828824,6	22,95	20,23	<b>72,9</b>
11:40	19,5	25,5	6,1	764991,0	22,66	20,12	<b>72,1</b>
11:50	19,5	26,6	7,1	896850,5	23,31	20,23	<b>69,7</b>
12:00	20,0	29,7	9,7	1218265,2	22,41	19,94	<b>117,9</b>
12:10	20,4	27,5	7,1	895073,1	22,99	20,07	<b>73,5</b>
12:20	20,7	27,7	7,0	878345,1	22,83	19,88	<b>71,3</b>
12:30	20,9	25,1	4,3	535859,2	22,50	20,12	<b>53,9</b>
12:40	21,0	30,5	9,6	1204682,2	23,18	19,91	<b>88,1</b>
12:50	21,2	28,1	6,9	866969,5	22,40	20,14	<b>91,8</b>

13:00	21,4	28,5	7,1	899760,8	23,04	20,14	<b>74,3</b>
13:10	22,7	28,5	5,8	731550,5	22,49	19,90	<b>67,5</b>
13:20	22,9	26,6	3,7	470989,6	22,72	20,19	<b>44,5</b>
13:30	23,0	30,5	7,5	946879,6	22,59	19,88	<b>83,5</b>
13:40	22,8	34,3	11,5	1453983,5	22,20	19,97	<b>155,9</b>
13:50	22,9	30,3	7,4	927702,7	23,06	20,13	<b>75,7</b>
14:00	23,5	27,7	4,2	524995,3	22,23	19,83	<b>52,3</b>
14:10	24,1	31,9	7,8	988106,9	22,75	20,14	<b>90,6</b>
14:20	24,2	38,3	14,0	1769115,8	22,63	19,93	<b>156,6</b>
14:30	24,7	31,0	6,3	788222,4	22,66	20,02	<b>71,6</b>
14:40	25,2	31,9	6,7	842030,9	22,77	20,01	<b>72,9</b>
14:50	25,4	29,7	4,3	542929,2	22,51	19,97	<b>51,1</b>
15:00	25,5	33,5	8,0	1009038,1	22,81	20,18	<b>91,7</b>
15:10	26,0	42,4	16,4	2066368,8	22,54	19,93	<b>189,2</b>
15:20	26,6	32,9	6,3	789298,5	22,68	20,15	<b>74,5</b>
15:30	27,5	34,8	7,3	922923,2	22,60	20,01	<b>85,3</b>
15:40	27,9	35,5	7,6	959003,9	22,69	20,03	<b>86,1</b>
15:50	28,9	37,3	8,3	1051543,0	22,80	20,09	<b>92,8</b>
16:00	29,1	36,3	7,1	896313,7	22,57	19,88	<b>79,6</b>
16:10	28,9	36,8	7,9	992695,4	22,86	20,04	<b>84,3</b>
16:20	29,4	33,1	3,7	462633,9	22,41	19,89	<b>43,9</b>
16:30	29,5	35,8	6,3	792540,5	22,66	20,03	<b>72,1</b>
16:40	29,4	41,9	12,5	1574168,0	22,69	19,83	<b>132,0</b>
16:50	29,3	36,3	7,0	879177,7	22,50	20,13	<b>88,8</b>
17:00	29,2	37,3	8,0	1009910,9	22,71	20,05	<b>90,9</b>
17:10	28,0	34,5	6,5	824503,1	22,48	19,92	<b>76,9</b>
17:20	25,9	34,1	8,1	1023568,2	22,80	20,03	<b>88,5</b>
17:30	25,1	30,8	5,6	707067,9	22,70	19,99	<b>62,4</b>

17:40	24,4	30,5	6,1	772881,3	22,56	20,11	<b>75,4</b>
17:50	23,9	27,5	3,6	453635,5	22,70	20,03	<b>40,6</b>
18:00	23,7	27,9	4,2	527938,8	22,52	19,90	<b>48,2</b>
18:10	22,1	29,6	7,5	942790,0	22,80	20,14	<b>84,8</b>
18:20	21,9	30,3	8,4	1054276,4	22,42	19,84	<b>97,6</b>
18:30	21,6	27,0	5,5	687812,9	22,59	20,04	<b>64,5</b>
18:40	21,4	27,7	6,3	791682,4	22,80	19,84	<b>64,1</b>
18:50	21,7	27,9	6,1	774390,6	22,48	20,12	<b>78,6</b>
19:00	21,7	29,8	8,1	1020915,3	22,75	19,96	<b>87,3</b>
19:10	21,9	40,9	18,9	2386746,9	22,68	19,85	<b>201,9</b>
19:20	22,1	30,1	8,0	1003868,7	22,79	20,16	<b>91,2</b>
19:30	22,1	26,4	4,3	539726,0	22,28	19,82	<b>52,5</b>
19:40	22,1	27,5	5,3	673549,0	22,52	20,18	<b>69,0</b>
19:50	22,1	30,3	8,2	1032665,1	22,68	19,89	<b>88,5</b>
20:00	22,1	27,2	5,1	647166,9	22,47	20,12	<b>65,9</b>
20:10	22,1	31,2	9,1	1148773,1	23,03	19,92	<b>88,4</b>
20:20	22,1	30,5	8,4	1061569,5	22,68	19,95	<b>93,0</b>
20:30	22,1	27,7	5,6	701399,9	22,02	19,81	<b>75,7</b>
20:40	22,1	24,9	2,8	354703,0	21,69	19,84	<b>45,8</b>
20:50	22,1	26,4	4,3	539726,0	22,13	19,93	<b>58,9</b>
21:00	22,5	29,8	7,4	929143,0	22,77	19,94	<b>78,6</b>

*Taula B.3.1 Taula del càlcul del cabal d'aigua que circula a través d'una torre de refrigeració.*